

# CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA COSTERA Y PLANTEAMIENTO DE ELEMENTOS TÉCNICOS PARA LA ELABORACIÓN DE CRITERIOS DE REGULACIÓN Y MANEJO SUSTENTABLE



Rodolfo Silva Casarín, Monique M. Villatoro Lacouture, Francisco J. Ramos Durón  
Daniela Pedroza Paez, Mario A. Ortiz Pérez, Edgar G. Mendoza Baldwin  
Miguel A. Delgadillo Calzadilla, Mireille Del Carmen Escudero Castillo  
Angélica Félix Delgado y Abril Cid Salinas



# CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA COSTERA Y PLANTEAMIENTO DE ELEMENTOS TÉCNICOS PARA LA ELABORACIÓN DE CRITERIOS DE REGULACIÓN Y MANEJO SUSTENTABLE

ISBN: 978-607-02-6287-6

Rodolfo Silva Casarín, Monique M. Villatoro Lacouture, Francisco J. Ramos Durón  
Daniela Pedroza Paez, Mario A. Ortiz Pérez, Edgar G. Mendoza Baldwin  
Miguel A. Delgadillo Calzadilla, Mireille Del Carmen Escudero Castillo  
Angélica Félix Delgado y Abril Cid Salinas



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM®**



*Caracterización de la zona costera y planeamiento de elementos técnicos  
para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*

DR © 2014 UNAM/SEMARNAT

ISBN: 978-607-02-6287-6

“Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio,  
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales”.

# CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA COSTERA Y PLANTEAMIENTO DE ELEMENTOS TÉCNICOS PARA LA ELABORACIÓN DE CRITERIOS DE REGULACIÓN Y MANEJO SUSTENTABLE

RODOLFO SILVA CASARÍN<sup>(1)</sup>

MONIQUE M. VILLATORO LACOUTURE<sup>(1)</sup>

FRANCISCO J. RAMOS DURÓN<sup>(2)</sup>

DANIELA PEDROZA PAEZ<sup>(2)</sup>

MARIO A. ORTIZ PÉREZ<sup>(3)</sup>

EDGAR G. MENDOZA BALDWIN<sup>(1)</sup>

MIGUEL A. DELGADILLO CALZADILLA<sup>(1)</sup>

MIREILLE DEL CARMEN ESCUDERO CASTILLO<sup>(1)</sup>

ANGÉLICA FÉLIX DELGADO<sup>(1)</sup>

ABRIL CID SALINAS<sup>(4)</sup>

(1) Instituto de Ingeniería – UNAM

(2) Dirección General de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial – SEMARNAT

(3) Instituto de Geografía – UNAM

(4) Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología -UNAM

Esta publicación fue financiada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con recursos del Programa Presupuestal U021 "Programa de Desarrollo Institucional y Ordenamientos Ecológicos Ambientales", Ejercicio Fiscal 2011.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1. ACERCA DE ESTE LIBRO .....	3
1.2. ANTECEDENTES.....	3
1.2.1. Manejo Integrado de la Zona Costera (MIZC) .....	4
1.2.2. Experiencias internacionales de MIZC .....	4
1.2.3. Estado del MIZC en México .....	7
1.3. OBJETIVO .....	9
1.3.1. Objetivos particulares .....	9
<b>2. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES COSTEROS</b> .....	<b>11</b>
2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS COSTAS MEXICANAS .....	11
2.1.1. La zona costera .....	11
2.1.2. Caracterización geomorfológica.....	17
2.1.3. Caracterización hidrodinámica .....	22
2.1.4. Caracterización ecológica .....	29
2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS COSTAS.....	35
2.2.1. Clasificación por tipo de costa .....	35
2.2.2. Clasificación por geodinámica costera.....	40
2.2.3. Clasificación hidrodinámica .....	44
2.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RIESGO .....	47
2.3.1. Peligros .....	47
2.3.2. Vulnerabilidad.....	50
2.3.3. Propuesta de estrategias de mitigación ante impactos .....	51
2.4. REGIONALIZACIÓN DE LA COSTA .....	52
2.4.1. Zonificación .....	53
2.4.2. Delimitación de límites marinos y terrestres .....	60
2.5. IDENTIFICACIÓN DE AMBIENTES COSTEROS.....	62
<b>3. ANÁLISIS DE IMPACTOS EN EL DESARROLLO DE OBRAS Y ACTIVIDADES POR TIPO DE AMBIENTE</b> .....	<b>67</b>
<b>4. DESCRIPCIÓN DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS REQUERIDOS A NIVEL LOCAL</b> .....	<b>91</b>
4.1. OBJETIVOS .....	91
4.2. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN COSTERA A NIVEL LOCAL .....	93
4.2.1. Bahía Banderas.....	93
4.2.2. Holbox .....	97
4.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES PELIGROS .....	99
4.4. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD .....	100

4.5. RECOMENDACIONES PARA EL MANEJO Y PROPUESTA DE ELEMENTOS TÉCNICOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE OBRAS Y ACTIVIDADES A NIVEL UNIDAD DE MANEJO.....	105
4.5.1. <i>Bahía Banderas</i> .....	106
4.5.2. <i>Holbox</i> .....	106
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>109</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>113</b>

## Resumen

La gestión integrada de las zonas marinas y costeras debe caracterizarse por ser integral, adaptativa, participativa y fundamentada en la mejor información científica disponible, de tal forma que una caracterización de las costas a nivel nacional es imprescindible para proveer las bases técnicas que sustenten el establecimiento de políticas públicas y programas específicos para la protección y manejo sustentable de la zona costera.

A pesar de los esfuerzos llevados a cabo previamente para institucionalizar la gestión de la zona costera en México, entre los cuales destacan la Propuesta de Estrategia Ambiental para la Gestión Integrada de la Zona Costera de México (INE, 2000), realizada durante el sexenio 1994-2000, y el establecimiento del Programa de Manejo Integral de la Zona Costera (SEMARNAT), durante el sexenio 2000-2006, la gestión de la zona costera ha sido abordada de una manera desvinculada entre los diferentes niveles de gobierno y la sociedad, lo cual ha impedido capitalizar y poner en práctica algunas de las propuestas hechas con anterioridad. Por otra parte, frecuentemente estas propuestas han tenido un enfoque regionalista o sectorial, que ha carecido de una visión integrada de los problemas y sus soluciones.

La caracterización de las costas a nivel nacional es imprescindible para proveer las bases técnicas que sustenten el establecimiento de políticas públicas y programas específicos para la protección y manejo sustentable de la zona costera. Este estudio presenta una caracterización y clasificación de los principales ambientes costeros del país, así como la propuesta de lineamientos y regulaciones de obras y actividades que podrían desarrollarse en estos ambientes costeros. Ello permitirá que la gestión integrada de las zonas costeras cuente con información científica relevante.

Este estudio consta de: (1) una caracterización geomorfológica, hidrodinámica y ecológica; (2) un análisis de los impactos potenciales por ambiente costero; y (3) una evaluación de dos casos de estudio.

La caracterización geomorfológica, hidrodinámica y ecológica permitió generar una clasificación y zonificación de la costa, que consta de 14 mega regiones costeras cuyos límites son coincidentes con zonificaciones propuestas previamente (Ortiz Pérez y de la Lanza Espino, 2006), así como la identificación de 28 tipos de ambientes costeros representativos del litoral mexicano.

Para la caracterización de los ambientes costeros se consideró como aquel definido por la combinación de sus características hidrodinámicas, geomorfológicas y ecológicas, de tal forma que se va más allá de lo propuesto por otras clasificaciones meramente ecológicas (Sarukhán *et al.*, 2009) o basadas en el mecanismo generador (Shepard, 1973), tan utilizadas con anterioridad. Para esto último se propuso un nuevo sistema de identificación y clasificación que organiza dichas características en forma jerárquica, con un total de 28 ambientes costeros identificables.

Posteriormente, siguiendo un modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), se realizó un análisis de los principales impactos que se pueden presentar por ambiente costero. Algunos de los problemas más relevantes de las zonas costeras de México son la pérdida del hábitat en zonas intermareales, dunas o acantilados, debida al cambio de uso de suelo para desarrollos urbanos, portuarios y turísticos, la minería o la extracción de materiales utilizados como relleno en la construcción; la desaparición de humedales por cambios en el uso de suelo, relleno, desecación o el azolvamiento o sedimentación de estos, resultado de cambios cuenca arriba; entre otros. A partir del análisis PER realizado, se plantearon lineamientos y criterios



dirigidos a regular las actividades y obras que se desarrollan en cada uno de los ambientes costeros identificados, fundamentados en experiencias y regulaciones internacionales de manejo. Como complemento a lo anterior se aplicó un modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencia (SPRC, por sus siglas en inglés) que permitió: (a) identificar las áreas de mayor riesgo de inundación por eventos hidrometeorológicos; y (b) resaltar que las medidas de mitigación más eficientes son la protección de dunas y manglar, así como la regulación del desarrollo urbano en la zona costera.

Finalmente, se evaluaron dos casos de estudio a nivel de unidad de manejo: Isla Holbox, en Quintana Roo y Bahía Banderas, en Jalisco y Nayarit. Dicho ejercicio permitió identificar los parámetros más importantes en términos de caracterización a nivel local, cuyo conocimiento es imprescindible para el planteamiento de regulaciones de obras y actividades por tipo de ambiente. Los parámetros identificados son: (1) la elevación media, (2) la litología y tipo de sedimento, (3) las características morfológicas, (4) el desplazamiento vertical y horizontal de la línea de costa, (5) la altura máxima de ola, (6) la elevación de la marea astronómica y meteorológica, (7) el nivel de protección natural, y (8) el nivel de protección artificial.

Los resultados de este estudio pueden ser utilizados como fundamento para nuevos instrumentos normativos o implementarse en aquellos que cuentan con disposiciones sobre la zona costera; entre ellos, los más importantes en materia federal son: (a) los programas de manejo de las Áreas Naturales Protegidas (ANP); (b) los programas de Ordenamiento Ecológico del Territorio (OET); (c) la Evaluación de Impacto Ambiental; (d) la administración de la Zona Federal Marítimo Terrestre; (e) las Normas Oficiales Mexicanas (NOM, como la NOM-022-SEMARNAT-2003, NOM-036-SCT4-2007, entre otras); y (f) las Normas Mexicanas (NMX, como la NMX-AA-120-SCFI-2005, NMX-AA-119-SCFI-2006, NMX-AA-133-SCFI-2006, etc.).

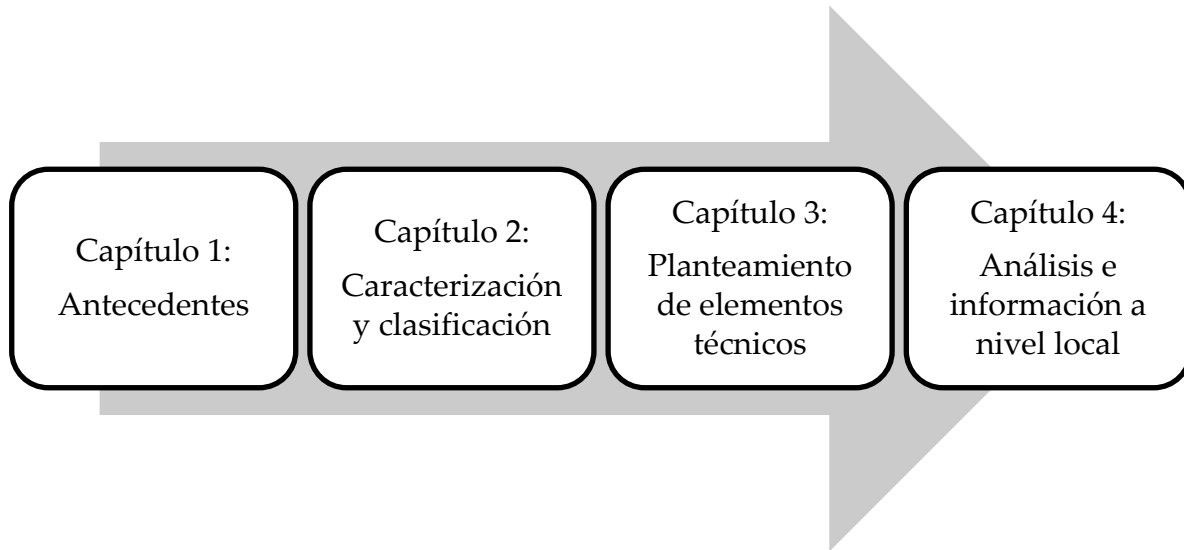
# 1. Introducción

## 1.1. Acerca de este libro

Este libro está dividido en 4 partes: un capítulo introductorio, donde se exponen los antecedentes y objetivos de este estudio y los capítulos 2, 3 y 4 que corresponden a los resultados de las siguientes tres líneas de análisis (ver Figura 1.1):

1. Caracterización y clasificación de ambientes costeros
2. Planteamiento de elementos técnicos para el desarrollo de actividades y obras en cada tipo de ambiente costero
3. Descripción de información y análisis requeridos a nivel local

Adicionalmente se incluyen dos Anexos, de los cuales, el primero contiene información detallada del análisis de oleaje y viento llevado a cabo como parte de la caracterización hidrodinámica; y el segundo incluye la estimación de los peligros hidrometeorológicos, realizada para el análisis de riesgo costero.



**Figura 1.1 Estructura del documento**

## 1.2. Antecedentes

El litoral mexicano, con más de 11 000 km de longitud, alberga numerosos hábitats naturales (ecosistemas) de gran importancia ecológica, al 15% de la población, y una gran variedad de actividades económicas vitales para el desarrollo del país, tales como la pesca y la acuicultura, la industria de la transformación, la transportación marítima y el turismo, entre otras (INEGI, 2001). Esta diversidad de usos frecuentemente conlleva conflictos ambientales, administrativos, de ordenamiento territorial y de gestión de recursos, por lo que contar con regulaciones claras, fundamentadas y aplicables es de primordial importancia para lograr un manejo adecuado de esta zona. Adicionalmente, en la actualidad se reconoce que la generación y aplicación de políticas públicas y programas específicos debe estar basada en un conocimiento profundo de la zona costera y los procesos que la afectan, por lo que una caracterización de las costas a nivel nacional es

imprescindible para proveer las bases técnicas que sustenten el establecimiento de criterios de regulación que aseguren la protección y el manejo sustentable de la zona costera.

### 1.2.1. Manejo Integrado de la Zona Costera (MIZC)

El Manejo Integrado de la Zona Costera es un proceso continuo y dinámico de participación y gestión que articula estado y sociedad para contribuir al ordenamiento territorial y el adecuado uso de la costa, en pos de la calidad de vida de las comunidades ([www.procostas.org](http://www.procostas.org)). La mayoría de los estudios que se han realizado para evaluar la eficacia de los sistemas de gestión costera coinciden en que el proceso es cíclico y que su éxito depende de la retroalimentación entre las diferentes fases. Con base en lo anterior y para proveer de contexto al lector, en este documento se hace un resumen de los avances logrados en esfuerzos previos a nivel nacional e internacional en materia de caracterización y regulación del litoral.

#### Metas del MIZC

Las metas del Manejo Integrado de la Zona Costera son:

- 1) Reducir la vulnerabilidad de la zona costera a riesgos naturales (erosión, inundaciones, salinización de acuíferos)
- 2) Mantener la conservación de la biodiversidad costero-marina y los procesos ecológicos esenciales, como son el flujo de nutrientes y de energía
- 3) Sostener los servicios ambientales provistos por los ecosistemas costero-marinos, tales como el mantenimiento de la calidad gaseosa de la atmósfera, mejoramiento de la calidad del agua, control de ciclos hidrológicos (incluyendo inundaciones), alimento, etc.
- 4) Resguardar la calidad de vida de las comunidades litorales, favoreciendo el desarrollo sustentable de las áreas marino-costeras
- 5) Recuperar y rehabilitar zonas que han sido afectadas
- 6) Procurar un aprovechamiento correcto de los recursos costeros evitando conflictos entre usos y procesos naturales.

#### Condiciones necesarias

Para que un MIZC pueda ser llevado con éxito a la práctica es necesario contar con:

- Una sólida Información de base (datos y mediciones de procesos naturales, sociales y económicos) que pueda ser fuente de indicadores.
- Establecer metas y delinear políticas basadas en procesos participativos.
- Contar con medios (legales, institucionales, técnicos, financieros y humanos) para llevar adelante las metas y políticas establecidas.

Este documento se centra en los dos primeros puntos, como se describe en los resultados de la caracterización y propuestas detallados a continuación.

### 1.2.2. Experiencias internacionales de MIZC

La tendencia a ignorar el valor de los esfuerzos previos es contraria al principio de aprender de la experiencia. Hay numerosos ejemplos de programas que avanzaron hasta los pasos tres o cuatro en las metas

del MIZC y que tropezaron y se estancaron, estas experiencias son siempre sumamente instructivas y deben ser cuidadosamente examinadas (Ochoa *et al.*, 2001).

Un punto importante a considerar y que ha sido evidente a partir de la investigación de experiencias en otros países, es que los Planes de Manejo Costero Integral que son operacionales y que han probado ser exitosos, son regionales, en todos los casos. De tal forma que lo que se proponga aquí será un marco de referencia para la creación de dichos planes regionales y no un plan nacional *per se*.

A continuación se presentan algunas de las experiencias dignas de considerarse en el ámbito internacional:

La Gestión Integrada de las Zonas Costeras en Estados Unidos goza ya de una amplia tradición y experiencia, de más de 40 años, siendo uno de los países más avanzados en este rubro. Desde que fuera promulgada por el Gobierno de Estados Unidos en 1972, la Ley relativa a la Ordenación de las Zonas Costeras (Coastal Zone Management Act, CZMA) ha contribuido a iniciar y facilitar la ordenación de las zonas a nivel de Estado. Este programa voluntario, basado en directrices generales y en un enfoque flexible, facilita la gestión suministrando fondos para la planificación y ejecución a nivel de Estado, y la revisión y aprobación federal de los programas de los Estados, así como prestando apoyo técnico y servicios de coordinación. Los 35 Estados costeros han participado en el programa, y 29 de ellos se dotaron de planes aprobados a nivel federal desde comienzos de 1993.

En virtud de las modificaciones de la CZMA en 1990 se establecieron dos nuevos programas:

- a. El programa de mejora de las zonas costeras alienta a los Estados a elaborar nuevos métodos en los ocho campos que corresponden a prioridades nacionales: protección de los humedales, mitigación de los riesgos a que está expuesto el litoral, acceso público al litoral, control de las repercusiones acumulativas y secundarias del desarrollo, reducción de los desechos marinos, gestión de los recursos oceánicos, gestión de zonas especiales y medidas destinadas a facilitar el aprovechamiento de energía costera y la construcción de instalaciones públicas. El programa de lucha contra la contaminación del litoral, proveniente de fuentes difusas (Coastal Nonpoint Pollution Control Program), exige que los Estados costeros que tienen programas de ordenación de la zona costera aprobados a nivel federal tomen medidas contra la contaminación imputable a fuentes difusas como la agricultura, los puertos de navegación de recreo y las escorrentías urbanas.
- b. El programa nacional de estuarios (National Estuary Program), establecido en 1987 en virtud de la Ley relativa al agua limpia (Clean Water Act), complementa la CZMA. Este programa ha dado un fuerte impulso y apoyo a la ordenación de algunos grandes estuarios amenazados por la degradación de la calidad del agua y los recursos biológicos. El objetivo de este programa es elaborar planes de ordenación, ejecución y vigilancia para cada estuario, basados en un adecuado conocimiento del sistema y de las dificultades.

Además de Estados Unidos, la Comisión Europea trabaja desde 1996 en el campo de evaluación y propuesta de medidas respecto a la situación de las zonas costeras en Europa, desarrollando un Programa de Demostración de Manejo Integrado de Zonas Costeras.

Esto derivó en la directiva 2002/413/CE, que ha resultado en la implementación de planes de manejo costero en varios países.

El Reino Unido cuenta con una serie de Planes de Manejo Costero a nivel regional (Shoreline Management Plans), los cuales describen no sólo el estado de la zona costera y su problemática, en gran detalle, sino también las estrategias de manejo. Destaca la definición de las 4 políticas de manejo de la línea de costa ([www.environment-agency.gov.uk](http://www.environment-agency.gov.uk)):

-Mantenimiento de la posición de línea de costa: Mantener o mejorar el nivel de protección provisto por las defensas costeras existentes.

-Avance de línea de costa: Construir nuevas defensas o estructuras que ganen terreno al mar, con respecto a la posición de la costa existente.

-Retrosceso o avance controlado de línea de costa: Permitir que la costa migre (tierra adentro o afuera), con un manejo controlado o que limite el movimiento.

-No intervención: La decisión de no invertir en un sistema de protección, o en su caso, dar mantenimiento a uno existente.

Los criterios utilizados para aplicar cada una de las políticas anteriores son:

- a. *Tendencia evolutiva de la costa.* Se trata de dejar que la naturaleza siga su curso tanto como sea posible, siempre y cuando no se contraponga con alguno de los otros criterios
- b. *Ambientales.* Importancia del ecosistema como hábitat de especies protegidas, por ejemplo
- c. *Económicos.* Valor de la infraestructura en riesgo y capacidad económica existente para protegerla
- d. *Sociales.* Cantidad de gente afectada, condiciones de negociación con la gente afectada
- e. *Históricos.* Valor cultural e histórico de la infraestructura

Todos estos se miden para evaluar la conveniencia y aplicabilidad de cada una de las políticas.

España por otra parte, experimentó un avance considerable en el sistema de gestión de sus áreas litorales al aprobar la Ley de Costas de 1988, Ley que ha sido y sigue siendo ejemplo mundial y punto de referencia de otros países. Sin embargo, dicha Ley estaba pensada principalmente para la gestión del dominio público marítimo terrestre (infraestructura costera, lineamientos para el desarrollo urbano y turístico) y no para el área litoral, en su sentido más amplio, donde se consideran de manera integral los procesos litorales y ecológicos, al lado de los socioeconómicos (Gómez Pina, 2002). Hasta el 2004, cuando se introdujeron las *Principales líneas de reorientación de la Política de costas* (Ministerio del Medio Ambiente, MMA, 2004), no se contaba con algún tipo de política costera explícita. Esto ha cambiado en tiempos recientes, como resultado de las directivas europeas; en 2006, España remitió a la Comisión Europea el informe requerido por la directiva 2002/413/CE sobre la aplicación del MIZC en Europa, siendo el documento un informe técnico más que una estrategia. Finalmente en 2007, con la *Estrategia de Sostenibilidad de la Costa* (Ministerio del Medio Ambiente, MMA, 2007), se introduce una fuerte decisión política para asumir los principales problemas del litoral español (Arenas Granados, 2010). De este ejercicio vale la pena rescatar la habilidad con que se han logrado organizar los diferentes niveles de gobierno existentes en España y la posibilidad de cambiar de manera drástica el panorama del MIZC en un país, en tan poco tiempo.

También existen ejemplos de experiencias en países en desarrollo, en donde se han logrado importantes avances en términos de gestión y ordenamiento costero. Uno de ellos es Malasia. En los 1990's el estado de Sabah (a través de un programa de cooperación entre Malasia y Dinamarca) comenzó una iniciativa para el Manejo Integrado de su Zona Costera, que derivó en una serie de instrumentos aplicables. Uno de ellos fue la

clasificación de Hábitats Naturales (ecosistemas) de Sabah, que caracterizó y clasificó todas las lagunas, estuarios, marismas y humedales, que componen la mayor parte de la zona costera de este país. Como base usaron la clasificación USAFWS en uso en los Estados Unidos en ese momento. Esfuerzos posteriores permitieron la inclusión de esta información al Sistema de Información Geográfica, creado como parte del programa de MIZC de Sabah. Este programa definió los límites de la zona costera con base en alturas topográficas y aprovechamiento después los límites catastrales para subdividir la zona costera. Este enfoque, aunque simplificado fue el resultado de la poca información y presupuesto disponibles, pero significó un gran avance. Para el 2010, se decidió actualizar este sistema de MIZC con una mejor definición de la zona costera.

### 1.2.3. Estado del MIZC en México

Se han realizado grandes esfuerzos por avanzar en temas del Manejo Integrado de la Zona Costera en México, uno de ellos es la Propuesta del INE (2000): *Estrategia ambiental para la gestión integrada de la zona costera en México*, la cual, a pesar de haber representado un gran paso, está basada solamente en la problemática identificada (ecológica y socioeconómica) y no en una caracterización más amplia (morfológica, hidrodinámica, ecológica, de riesgo, etc.). Lo mismo sucede con la *Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sustentable de Océanos y Costas de México* (SEMARNAT, 2006). Por el contrario, y con base en la definición presentada del enfoque integral de la gestión costera, en el presente documento se plantea conjuntar ambas visiones, siguiendo una metodología similar a la de la *Propuesta Metodológica para la Regionalización de los Mares Mexicanos* (Espejel y Bermúdez, 2009), en la cual se incluyen de manera explícita las características geomorfológicas de la costa, a un lado de las socioeconómicas y ecológicas.

Otra contribución importante se registró en el año de 2003, con la publicación del *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (LGEEPA), en materia de ordenamiento ecológico, la cual, de acuerdo a (Espejel y Bermúdez, 2009), dio la pauta para la realización de diversas investigaciones con miras al Ordenamiento Ecológico Marino, en particular en el Golfo de California.

Adicionalmente, el análisis PER (Presión-Estado-Respuesta) se ha llevado a cabo en varias regiones costeras de México, especialmente en el noroeste del país, con la finalidad de generar indicadores del estado y desarrollo de esta región costera. El proyecto de ordenamiento ecológico marino del Golfo de California utilizó este modelo (Espejel *et al.*, 2004) y metodológicamente es un antecedente importante porque es el primer ordenamiento marino decretado en el país. El modelo ha sido aplicado en casos regionales en el noroeste de México (García Gastelum, 2006) y en casos locales: ordenamiento ecológico de San Quintín (Arredondo García, 2006), ordenamiento costero entre Tijuana y Ensenada (Bringas y Touders, 2011), ordenamiento costero en Campeche (Rivera Arriaga, 2007) y en áreas protegidas (Espejel *et al.*, 2005).

De lo logrado en esfuerzos previos, en particular vale la pena rescatar la identificación y caracterización de los problemas de México realizada como parte de la *Estrategia ambiental para la gestión integrada de la zona Costera en México*, así como sus recomendaciones para la implementación de la estrategia a nivel administrativo. En un nivel más detallado, se considera imprescindible el estudio de los ambientes costeros de forma individual, tal como se hizo para los manglares, en el libro *Manglares de México* (CONABIO, 2008), donde se hace una caracterización detallada, acompañada de un análisis tipo PER de la problemática de este ambiente. Finalmente se considera de gran utilidad reutilizar los datos recabados en los ordenamientos ecológicos y territoriales regionales que se han llevado a cabo.

Por otra parte, hasta el 2009, México había suscrito 62 tratados internacionales en materia de medioambiente (ASF, 2011c; Medina Estrada, 2011). De estos, 49 (79%) son multilaterales y 13 (21%) son bilaterales. Según el Artículo 133 de la Constitución Política de México, los tratados son Ley suprema y por tanto, deben cumplirse; desafortunadamente, de acuerdo a los informes de la Auditoría Superior de la Federación (ASF), esto no siempre es así. De acuerdo a sus reportes sobre el cumplimiento de tratados en materia de medio ambiente por parte de las tres instancias involucradas en el manejo costero en México, la Secretaría de Marina (SEMAR), la Secretaría de Relaciones Exteriores (SER) y la SEMARNAT, para el año 2009, sólo esta última no fue evaluada negativamente (ASF, 2011a; ASF, 2011b; ASF, 2011c). La SRE es responsable de la coordinación y seguimiento del cumplimiento de los tratados internacionales, mientras que la SEMARNAT y la SEMAR son las ejecutoras de los compromisos de los tratados internacionales en materia de medio ambiente.

Algunos de los tratados más relevantes son:

1. Comisión de Desarrollo Sustentable (CDS) Agenda 21, Cap. 17
2. PAM: Programa de Acción Mundial-PNUMA
3. FAO
4. Convención sobre Humedales de Importancia Internacional como hábitat de Aves Acuáticas (RAMSAAR)
5. Declaratoria de Montreal
6. Comisión de Cooperación Ambiental para América del Norte (CCA) – Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN)
7. Comisión Centroamericana de Medio Ambiente y Desarrollo (CCAD)
8. Convenio para la Protección y el Ordenamiento Sostenible del Medio Ambiente Costero del Pacífico Nordeste
9. Mecanismo de Cooperación Económica Asia – Pacífico (APEC)
10. Acuerdos binacionales con Japón, Estados Unidos (Programa Frontera Norte, EPA, USAID) y Canadá.

De acuerdo a la Auditoría de Desempeño, correspondiente al año 2009, la SEMAR no atendió los compromisos de los tratados en materia de medio ambiente, porque únicamente participó en 4 (12.5%) de los 32 tratados que, de acuerdo con la Secretaría de Relaciones Exteriores, le correspondía participar en materia de contaminación marina y biodiversidad de los ecosistemas marinos y costeros (ASF, 2011c).

Por su parte, la SEMARNAT, aunque sí realizó acciones encaminadas al cumplimiento de sus obligaciones en materia de los tratados mencionados, registró fallas en materia de coordinación interna en el seguimiento a dichas actividades.

Finalmente se reportó que la SRE no dispuso de sistemas de información que garantizaran que las dependencias responsables de su ejecución ejercieran las medidas y competencias que le otorgan los instrumentos internacionales suscritos por México, ya que se presentaron diferencias en cuanto al reconocimiento de la participación de las dependencias ejecutoras entre lo reportado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Marina (SEMAR), en el cumplimiento de los tratados sobre contaminación marina y biodiversidad.

De los informes de evaluación de la ASF, se puede concluir que gran parte de las fallas detectadas derivan de la falta de vinculación y definición de responsabilidades entre las diferentes instancias involucradas. Se

propone que en la aplicación de los lineamientos y regulaciones que se deriven de este documento se precisen las atribuciones y facultades de todas las instituciones involucradas en la zona costera, en los tres niveles de gobierno.

Las implicaciones y relevancia de estos tratados son diferentes en cada caso, sin embargo tomar acciones encaminadas a su cumplimiento debe ser de vital importancia en el planteamiento de cualquier plan nacional de manejo costero. Estas acciones pueden ser desde, identificación de los indicadores de estado, monitoreos de dichos indicadores, verificar el cumplimiento de las leyes ya existentes en material ambiental, tales como las que regulan el vertido de residuos al mar o la destrucción de hábitats protegidos.

En resumen, se puede decir que, a pesar de haber hecho esfuerzos importantes a nivel local y de estar suscritos a importantes acuerdos a nivel internacional:

- la situación del MIZC en México es aún incipiente, no existiendo todavía un programa de gestión integrada para las zonas costeras.
- La mayor debilidad detectada está relacionada a la falta de coordinación entre instituciones, la cual es el resultado de una amplia gama de competencias en diversas materias conferidas a las instituciones que inciden dentro del espacio marino y costero (ver Figura 1.2).
- Es necesario el desarrollo de una estrategia Nacional para el MIZC que incluya regulaciones claras para las actividades costeras y que a la vez delimite los métodos de aplicación y evaluación de éstas por parte de las diferentes instancias involucradas.
- Se espera que la propuesta de lineamientos y regulación realizada al final de este proyecto provea las bases de algún tipo de instrumento normativo.

### 1.3. Objetivo

Generar una clasificación de los ambientes costeros a nivel nacional, así como establecer las bases técnicas, bajo el enfoque de Manejo Integral de la Zona Costera (MIZC), para definir lineamientos y criterios de regulación para las obras y actividades que se desarrollan en los ambientes costeros y que se apliquen en los diversos instrumentos de planeación y gestión ambiental.

#### 1.3.1. Objetivos particulares

1. Elaborar una clasificación y caracterización de los principales ambientes costeros que se encuentran en el país, con base en su dinámica física, oceanográfica y geomorfológica.
2. Identificar las zonas de riesgo en la zona costera (erosión, inundación, etc.) en las que se deberán implementar medidas de protección y prevención.
3. Plantear lineamientos y criterios de regulación específicos para el desarrollo sustentable de actividades y obras en cada tipo de ambiente costero.
4. Describir la información y los análisis que se requieren integrar para definir regulaciones más específicas para las diversas obras y actividades a nivel local.



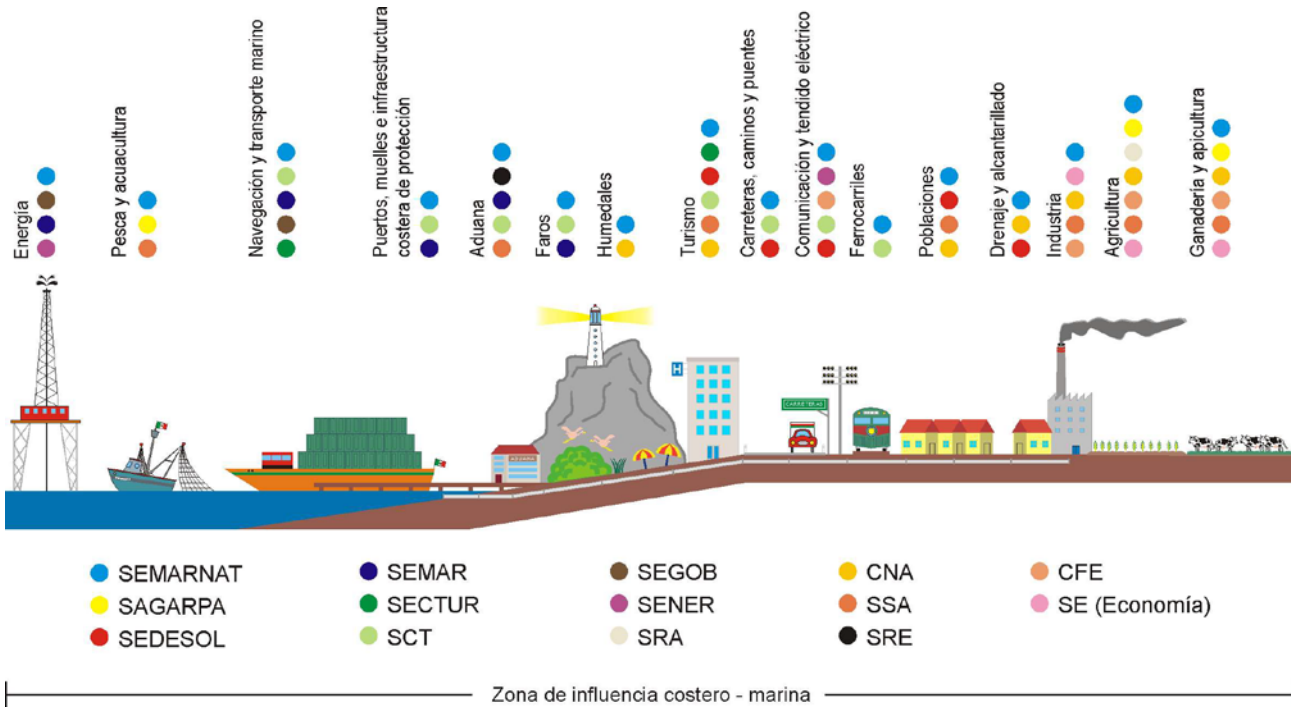


Figura 1.2 Zona de influencia de instituciones del gobierno federal en el espacio marino y costero ([http://www.semarnat.gob.mx/quesemarnat/politica\\_ambiental/ordenamientoecologico/Pages/inicio.aspx](http://www.semarnat.gob.mx/quesemarnat/politica_ambiental/ordenamientoecologico/Pages/inicio.aspx); página consultada en diciembre de 2011)

## 2. Caracterización y clasificación de ambientes costeros

### 2.1. Caracterización de las costas mexicanas

En la actualidad existen diferentes metodologías para llevar a cabo el Manejo Integral de la Zona Costera (MIZC), sin embargo, en todas ellas destaca la importancia del conocimiento a priori de la zona de interés. Esta información es esencial puesto que de ella depende la identificación del o los problemas a los que se enfrenta el manejo. Lo anterior es importante ya que al comprender claramente la problemática que se pretende resolver, la definición de metas y objetivos para alcanzar un desarrollo sostenible serán adecuados (Félix Delgado, 2014).

Para obtener este conocimiento holístico de una zona costera, es necesario como primer punto tener una visión general y clara de las partes y propiedades que la componen, es decir llevar a cabo una descripción completa de la zona (ver sección 2.1.1, para información base sobre la zona costera y sus componentes). Como respuesta a la descripción surge la necesidad de determinar sus atributos particulares, aquellos que la distinguen claramente de otras áreas, realizando así su caracterización (ver sección 2.1.2 a 2.1.4, para detalles de la caracterización). Así pues teniendo descrita y caracterizada la zona en cuestión, conocida su problemática y planteados los objetivos es posible determinar de la manera más adecuada las estrategias y alternativas de regulación de actividades y obras.

La caracterización presentada en este trabajo contribuye a los avances logrados por estudios como la *Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional*, realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México (Ortiz Pérez y de la Lanza Espino, 2006), la muy detallada caracterización ecológica presentada en los tres volúmenes del libro *Capital Natural de México* (Sarukhán *et al.*, 2009), la regionalización propuesta en la *Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sustentable de Océanos y Costas de México* (SEMARNAT, 2006) y la *Propuesta Metodológica para la Regionalización de los Mares Mexicanos* (Espejel y Bermúdez, 2009), entre otros.

Siguiendo la metodología propuesta por Espejel y Bermúdez(2009), el proceso de clasificación y regionalización de la costa se realiza desde el punto de vista geográfico, de tal forma que el espacio se clasifica utilizando atributos geomorfológicos, hidrodinámicos y ecológicos.

#### 2.1.1. La zona costera

Si bien el concepto de zona costera se puede entender como la franja en la cual el medio marino y el terrestre adyacente se constituyen en un sistema cuyos elementos interactúan entre sí, aún no se tiene una definición universalmente aceptada, ya que estas influencias varían de lugar en lugar, por lo que la dimensión de la zona costera también varía. De tal forma que el problema principal en la definición de la zona costera está en términos de la gran variabilidad de las fronteras temporales y espaciales, así como a las diferentes perspectivas que se tienen de la tierra y el océano.

Existe una gran variedad de definiciones de la zona costera y de los límites que la precisan, los cuales generalmente están dados en función del enfoque utilizado. Este último puede tener fines científicos, administrativos, políticos, o de manejo.

En el sentido estricto (enfoque científico o ingenieril), la zona costera es la zona de transición entre el ambiente marino y terrestre, directamente bajo la influencia de los procesos hidrodinámicos marinos o lagunares, extendiéndose desde la plataforma continental en el límite oceánico, hasta el primer cambio topográfico importante (cuya altura es definida arbitrariamente en cada país) por encima del alcance del máximo oleaje de tormenta (CERC, 2000).

Por otra parte, la definición propuesta en el *Programa de Manejo Integral de la Zona Costera* (SEMARNAT), basada en la definición de Ambientes Costeros plasmada en la *Política Ambiental Nacional para el Desarrollo Sustentable de Océanos y Costas de México* de la SEMARNAT (2006), dicta que la Zona Costera está comprendida por todos los municipios con frente de costa y hacia mar adentro hasta las 12 millas de Mar Territorial (de acuerdo al Censo de Población y Vivienda del INEGI (2010), existen un total de 151 municipios con frente de costa, repartidos en 17 Estados y con una población de 17 303 428).

Es común en la práctica definir dos límites hacia el mar de la zona costera: (a) uno es la profundidad de cierre o profundidad hasta donde el oleaje es capaz de mover sedimentos, la cual normalmente es menor a los 25 metros de profundidad, y (2) plataforma continental, aproximadamente a 200 m de profundidad, donde claramente los procesos oceánicos de gran escala (corriente marinas) normalmente son más importantes que los de pequeña escala de la zona costera (mareas y oleaje). La delimitación en la parte continental depende de las características geológicas, morfodinámicas, ecológicas, económicas y sociales, así como del alcance o la superficie tierra adentro hasta donde se manifiestan los procesos oceánicos, debiendo estar dicho límite definido a nivel de cuenca hidrológica para cada caso en particular.

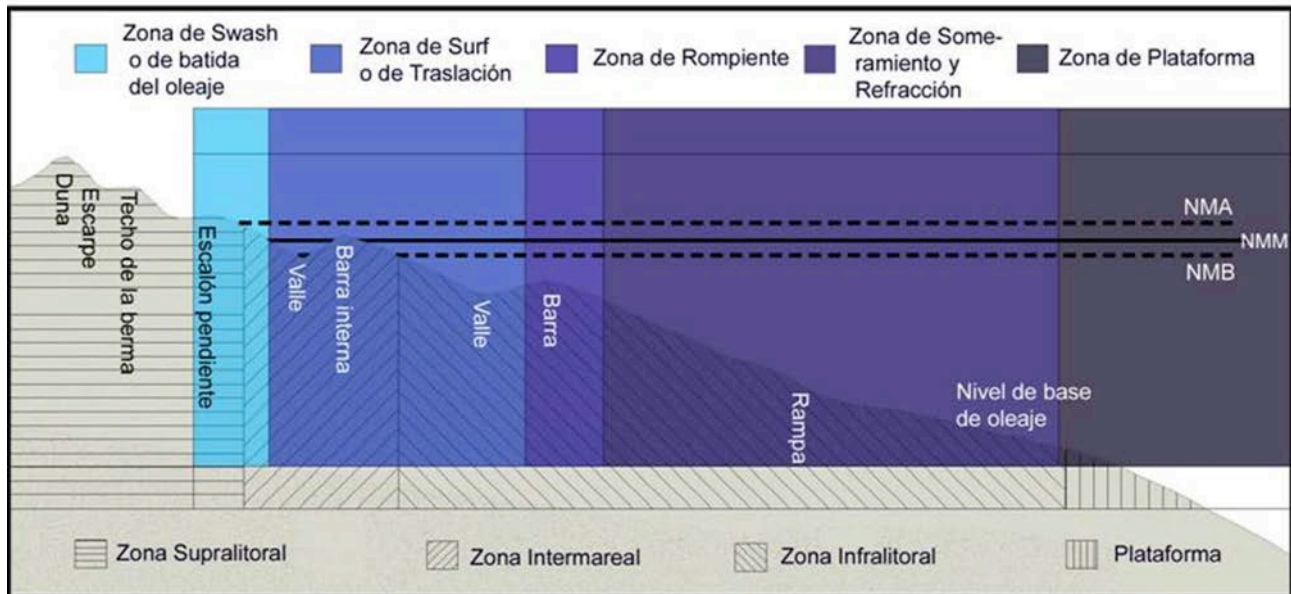
A pesar que, como demuestran las definiciones anteriores, el concepto de zona costera y sus límites varía según el contexto y país en que se utiliza, en este documento se especifica como la franja localizada entre el mar abierto y la superficie terrestre, de constante transformación originada por la gran actividad entre los procesos terrestres, marinos y atmosféricos como las corrientes marinas, las mareas, el oleaje, la abrasión, el viento, flujo de ríos en cuerpos semi-cerrados y las fluctuaciones del nivel del mar. Su alcance comprende la ribera misma, la transición física entre la tierra y el mar, los ecosistemas terrestres y adyacentes que afectan el mar a través de los procesos biológicos como el flujo de nutrientes o energía y los ecosistemas marinos afectados por su proximidad. Por lo tanto su extensión está en función de las características de las cuencas hidrográficas y del mar territorial en el que están inmersas, así como de los recursos naturales y condiciones socioeconómicas y políticas de los asentamientos humanos que en ellas influyen. Con esta definición, que considera tanto las características morfológicas, como hidrodinámicas y ecológicas, se intenta lograr el establecimiento de límites más precisos que los utilizados con frecuencia en otros países y con anterioridad en México (ver sección 2.4).

Para su estudio y manejo, la zona costera frecuentemente se divide en tres subambientes, con base en su hidromorfología (Figura 2.1):

- Zona *supralitoral*, que está afectada por la influencia marina sólo durante tormentas (cuando la altura del oleaje es al menos una desviación estándar mayor a la media). Su límite superior se caracteriza por un cambio brusco de la pendiente o en la composición y disposición del material. Sus formas más características son dunas y bermas (Davis, 1985). Esta sección se extiende tierra adentro cuando existen cuerpos de agua superficiales, como lagunas costeras. Los límites de esta zona, se determinan

entonces por el alcance de los ecosistemas adyacentes, como marismas o humedales, o de la cuña salina, en caso de que exista descarga de ríos a la laguna.

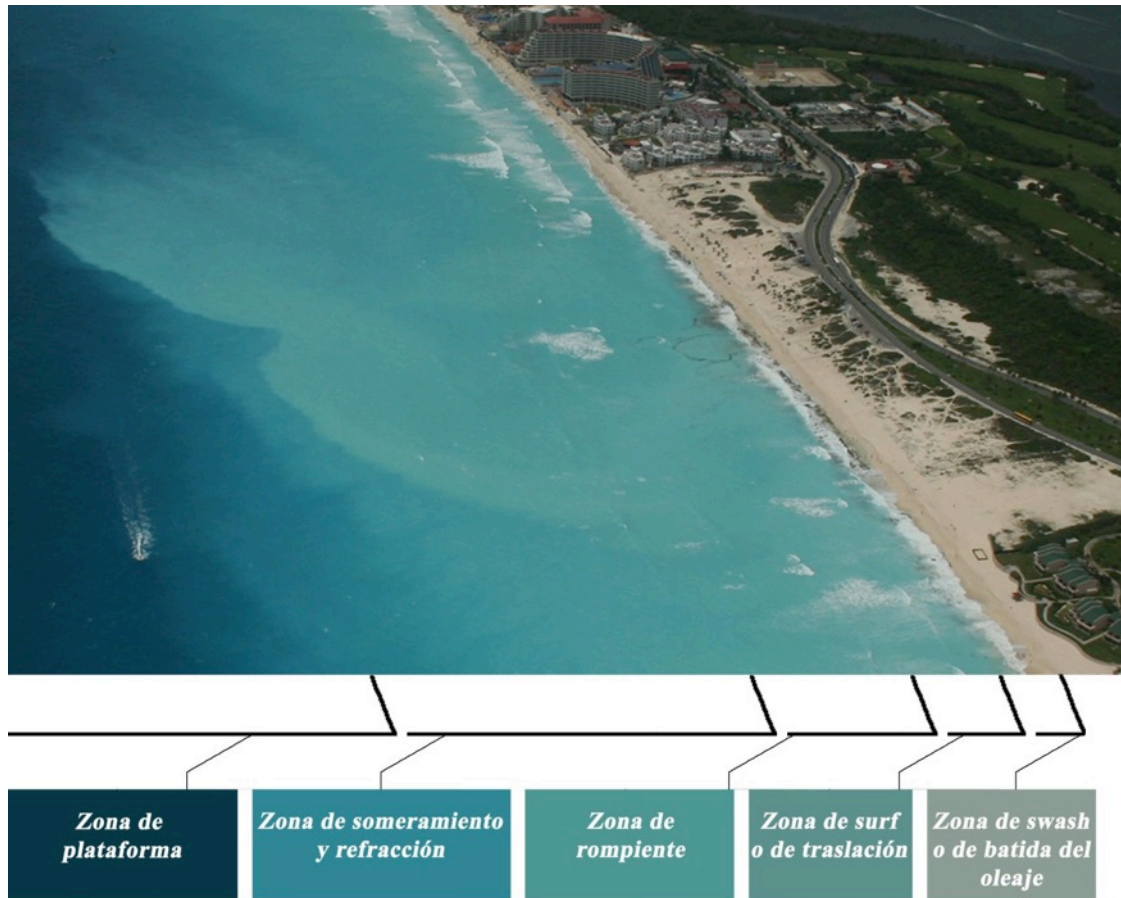
- Zona *intermareal*, comprendida entre los alcances superior e inferior de la marea en condiciones normales. Puede presentar escalón, y sucesión de barras de arena y surcos (Guillén y Díaz, 1990).
- Zona *infralitoral*, se extiende desde la base de la zona intermareal hasta el límite inferior de la acción del oleaje durante los temporales (Maldonado y Zamarreño, 1983). Las formas características de esta zona son las barras sumergidas de arena.



**Figura 2.1 Esquema de los ambientes de la zona litoral, donde NMA, NMM y NMB son el Nivel Medio Alto, Medio y Medio Bajo de marea, respectivamente (modificado de Guillén & Díaz, 1990)**

La subdivisión anterior, se puede refinar desde un punto de vista hidrodinámico (ver Figura 2.2), basándose en los trabajos de Davis (1985) y de Shepard (1973), descritos en el Manual de Ingeniería Costera de la USACE (CERC, 2000):

- *Zona de plataforma*, en la que las características del oleaje no están controladas por la topografía del fondo marino.
- *Zona de asomeramiento y refracción*, que es la zona en la que el fondo marino afecta a la ola, provocando un aumento de su altura (efecto de 'shoaling') y un cambio en su orientación (por refracción) en función de la topografía del fondo.
- *Zona de rompiente ('breaker zone')*, donde se alcanza la altura de ola máxima y en la que los efectos de fricción con el fondo impiden que continúe la traslación de la ola con esas características, provocando su rompimiento.
- *Zona de surf o de traslación ('surf zone')*, donde, una vez que la ola rompe, ésta avanza hacia la línea de costa formando un resalte ('bore') situado en el frente de ola. Es en esta zona donde se generan las corrientes de retorno.
- *Zona de swash o de batida del oleaje ('swash zone')*: cuando, tras el rompimiento de la ola, el resalte llega a la línea de costa, la ola asciende por la superficie de la zona interlitoral ('run-up') y posteriormente descende por efecto de la gravedad ('run-down').



**Figura 2.2 Ejemplo de ambientes de la zona litoral (modificado de <http://tampicoventures.com>)**

Finalmente, también se pueden usar subdivisiones con base en la distribución y existencia de comunidades de organismos que requieren la influencia marina; sin embargo, dada la gran diversidad de comunidades que existen en la zona costera y que difieren, dependiendo de su ubicación en el planeta, este tipo de subdivisiones son más difíciles de aplicar de manera general.

#### Elementos geomorfológicos de la zona costera

De acuerdo a Guillén y Díaz (1990), cada subambiente de la zona litoral suele estar caracterizado por la presencia de uno o varios elementos geomorfológicos que se indican a continuación y que son el resultado de la interacción de los ambientes dinámicos (viento, oleaje y corrientes) en cada uno de ellos.

#### *Zona supralitoral*

Los elementos geomorfológicos característicos de la zona supralitoral son cuatro: 1) campos de dunas, 2) llanuras de arena, 3) bermas y 4) escarpes de playa (ver Figura 2.3).

*Campos de dunas:* La existencia de campos de dunas es un hecho habitual en los litorales arenosos y especialmente en ambientes deltáicos. Los campos están orientados en función de los vientos de mayor eficacia y formados a partir de la erosión eólica de las llanuras de arena que los rodean.

*Llanuras de arena:* Son superficies subhorizontales que se extienden por kilómetros a lo largo de la zona supralitoral debido a la erosión eólica y a los efectos causados por oscilaciones del nivel marino como mareas

y tormentas. En función del proceso dominante pueden distinguirse llanuras eólicas, llanuras de tormenta y llanuras de marea.



**Figura 2.3 Algunos elementos morfológicos de la zonas supralitoral e intermareal. Imágenes modificadas de a) <http://tampicoventures.com> y b) Panoramio®**

*Berma:* Es el cuerpo de arena lineal, paralelo a la costa, que se presenta en la zona más próxima a tierra del perfil de playa. Tiene una sección triangular con una superficie superior horizontal o suavemente inclinada hacia tierra (techo de la berma) y una superficie de mayor inclinación hacia el mar (pendiente de la playa).

*Escarpe de playa:* La playa sufre una erosión durante las tormentas como consecuencia de la acción del oleaje incidente. Esta erosión puede quedar reflejada en forma de un escarpe que marca el límite superior de la zona intermareal. Las dimensiones del salto del escarpe pueden oscilar desde pocos centímetros hasta unos metros.

#### *Zona intermareal*

Los elementos geomorfológicos más significativos de la zona intermareal son: 1) pendiente de playa, 2) escalón, y 3) barras litorales.

*Pendiente de la playa:* Es un área plana, estrecha y alargada en la dirección longitudinal de la playa, inclinada hacia el mar y que coincide, al menos parcialmente con la zona de batido o lavado del oleaje (swash).

*Escalón:* Es una ruptura de pendiente debida al 'golpe' final de las olas antes de su ascenso por la pendiente de la playa (límite inferior de la pendiente).

*Barras litorales internas:* Esta forma incluye un sistema de barras y surcos situados paralelos y próximos a la línea de costa. Pueden presentarse emergidas o sumergidas (ver Figura 2.4).



**Figura 2.4 Ejemplo de barras litorales internas**

#### *Zona infralitoral*

La zona infralitoral está caracterizada por la presencia de dos formas: 1) barras de arena y 2) rampas limitadas por rupturas de pendiente.

*Barras de arena:* Son acumulaciones de arena en forma de cresta que presentan un surco asociado, situado hacia tierra. Están localizadas en la zona infralitoral y, por tanto, permanentemente sumergidas (ver Figura 2.5). La anchura de estos sistemas está entre 300 y 1 500 m, y pueden incluir, en un perfil perpendicular a la playa, hasta 30 barras y surcos asociados. La profundidad límite de estos sistemas está normalmente entre 5 y 10 m, con un espaciado entre crestas que se incrementa desde la costa hacia mar adentro.

Los mecanismos responsables de la formación de las barras están controlados por la velocidad orbital del oleaje incidente y, subordinadamente, por la acción de corrientes longitudinales y de retorno. Durante el período de calma que sucede a una tormenta se produce la construcción y migración hacia tierra de las barras longitudinales, regresando parte del sedimento erosionado y depositado en estas barras durante la tormenta, a las zonas intermareal y supralitoral (Guillén y Díaz, 1990).

*Rampa:* Es una superficie relativamente plana y suavemente inclinada, limitada por dos rupturas de pendiente. La ruptura de pendiente situada hacia tierra separa la rampa de la superficie más inclinada que

corresponde a la *pendiente de la playa*. Es decir, la rampa se desarrolla en la parte de la zona infralitoral no ocupada por las barras de arena y su límite inferior es la zona de plataforma, donde el transporte de sedimentos deja de estar controlado por las corrientes generadas por el oleaje (profundidad de cierre). Su localización depende fundamentalmente del nivel de base del oleaje incidente.



**Figura 2.5 Ejemplo de barras de arena sumergidas generadas en laboratorio**

### 2.1.2. Caracterización geomorfológica

Para realizar la caracterización geomorfológica a gran escala (nacional) se requirió analizar e interpretar información topográfica, de distribución climática, cuencas hidrográficas, geología, entre otros.

Los datos de zonas climáticas corresponden a la actualización de los datos generados originalmente por Enriqueta García (Ortiz Pérez y Espinosa Rodríguez, 1991), realizada por el Instituto de Geografía de la UNAM (ver Figura 2.6). Como se menciona en el libro *Capital Natural de México* (Sarukhán *et al.*, 2009), la forma de embudo del territorio mexicano, ancho en el norte y estrecho en el sur, los sistemas montañosos (Sierras Madre) que convergen hacia el sur y sureste de México, la acción de los vientos alisios y la oscilación estacional del cinturón subtropical de alta presión contribuyen a un patrón climático tan diverso que, al aplicar cualquier sistema de clasificación, todos los climas quedan representados en el país: desde muy secos en el norte, hasta subhúmedos y muy húmedos al sur; secos y subhúmedos en la vertiente pacífica hasta húmedos con lluvias todo el año en la vertiente del Golfo de México; tropicales sobre las costas y depresiones, hasta fríos en los picos de las montañas más altas, por encima de los 4 000 m de altitud (ver Tabla 2.1).

La regionalización de las cuencas hidrográficas de México, por otra parte, se digitalizó a partir del Mapa de Cuencas Hidrográficas de México del INEGI-INE-CONAGUA (Cotler *et al.*, 2007) (ver Figura 2.7 y Figura 2.8), en el cual se concibe a la cuenca hidrográfica como una unidad morfológica superficial, delimitada por líneas divisorias (parteaguas) desde las cuales escurren aguas superficiales. La delimitación de cuencas implica una demarcación de áreas de drenaje superficial donde las precipitaciones (principalmente las pluviales) que caen sobre éstas tienden a ser drenadas hacia un mismo punto de salida. En este caso sólo se consideraron las cuencas de tipo exorreicas, que son aquellas que descargan su escorrentía superficial hacia el mar.



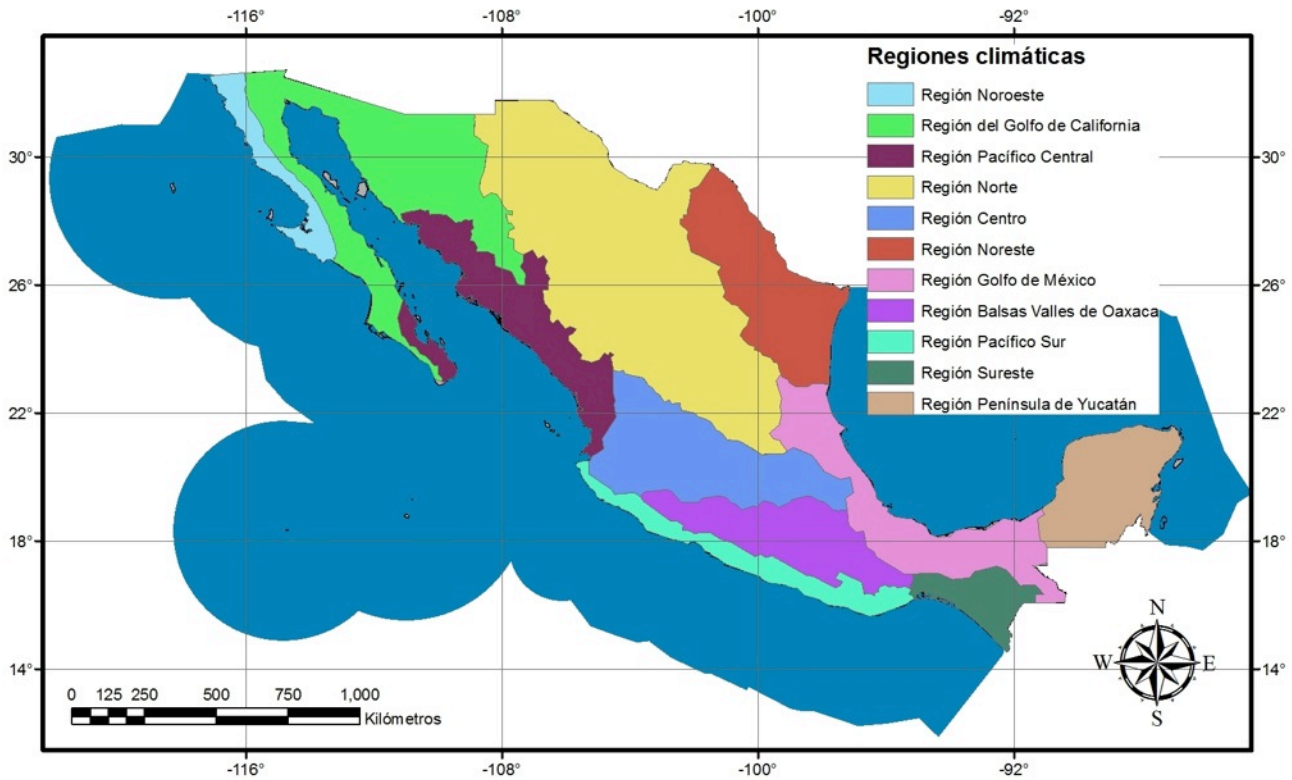


Figura 2.6 Zonas Climáticas de México (elaboración propia con datos del Instituto de Geografía de la UNAM)

Tabla 2.1 Zonas climáticas de México (Ortiz Pérez y Espinosa Rodríguez, 1991)

Zona climática	Climas (precipitación)	Climas (temperatura)
<b>Región Noroeste</b>	Seco y muy seco a lo largo de la costa y subhúmedo en las zonas montañosas	Semicálido, templado y semifrío, de sur a norte, con semifrío, observándose en las partes montañosas solamente
<b>Región Golfo de California</b>	Muy seco (evaporación excede precipitación)	Cálido en el litoral de Baja California, cambiando a semicálido y templado en las sierras, y semicálido en el litoral del norte de Sonora
<b>Región Pacífico Central</b>	De muy secos a subhúmedos (incrementando la precipitación hacia el este y hacia el sur, en franjas longitudinales paralelas al litoral y a la dirección general de la Sierra Madre)	Cálidos desde el nivel del mar hasta los 900 m de altitud, de ahí a los 1 600 m son semicálidos, después, hasta los 2 500 m se vuelven templados y más arriba semifríos
<b>Región Norte</b>	Secos en las sierras y muy secos en las planicies (evaporación excede precipitación)	Semicálidos en la parte central, templado en el altiplano y las sierras bajas. En altitudes mayores a 2 600 m los climas pasan a semifríos
<b>Región Centro</b>	Climas semisecos y subhúmedos. En general, la humedad aumenta hacia el	De cálidos, en los cañones en la cuenca del Río Grande de Santiago, así como del río Armería,

	sur al aumentar la altitud de las montañas	Col., a muy fríos o de nieves perpetuas sobre la Sierra Nevada, pasando por los semicálidos que se localizan a altitudes menores de 2 000 m, los templados en las laderas montañosas (2 000 a 2 800 m), los semifríos de 2 800 a 4 000 m, los fríos hasta 5 000 m y los de nieves perpetuas en las cúspides del Popocatepetl e Iztaccíhuatl (>5 000 m)
<b>Región Noreste</b>	Climas secos, semisecos y subhúmedos. Los subhúmedos se localizan en el suroeste de la región, sobre el piedemonte y sobre las laderas bajas de las sierras	Cálidos en las planicies y semicálidos y templados hacia las estribaciones de las sierras. En las cimas de las montañas de altitud superior a 2 800 m hay climas semifríos
<b>Región Golfo de México</b>	Predominan los climas húmedos y subhúmedos	Cálidos en la llanura costera, en los declives de las sierras se transforman en semicálidos y en las partes más elevadas en templados, semifríos y fríos
<b>Cuenca del Río Balsas y Valles de Oaxaca</b>	Balsas De áridos a subhúmedos en sus diferentes grados. Los áridos se localizan en la cuenca baja del río Tepalcatepec y en la cañada de Coahuayutla. Dentro de los subhúmedos, el de menor humedad ocupa la mayor parte de la cuenca baja del Balsas, desde 200 hasta 1 300 m, en las laderas del Eje Volcánico, en los estados de Michoacán, Guerrero, Puebla y Morelos. Por el norte, en las laderas australes del Eje Volcánico, los climas son algo más húmedos Oaxaca De áridos a semiáridos y subhúmedos. Son, en general, más secos en los lechos de los valles que en las laderas que los rodean, por el efecto de sombra que las montañas producen. A medida que la altitud aumenta los climas se vuelven más húmedos	Balsas En la cuenca del Balsas los climas cálidos predominan en las partes bajas hasta altitudes de 1 300 a 1 400 m. Más arriba se encuentran los semicálidos, hasta los 2 000 m de altitud; los templados entre los 2 000 y 2 800 m, sobre las laderas del Eje Volcánico; los semifríos de 2 800 a 4 000 m, en la parte alta de las sierras y las estribaciones del Nevado de Toluca, Ajusco, Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Malinche; los fríos a altitudes de 4 000 a 5 000 m; y finalmente, por encima de los 5 000 m, en los volcanes, se presentan climas muy fríos o de nieves perpetuas Oaxaca Climas cálidos y semicálidos en zonas bajas, templados en las zonas montañosas (2 000 m a 2 800 m) y semifríos en la región del Zempoaltépetl, a altitudes mayores de 2 800 m
<b>Región Pacífico Sur</b>	Predominan los subhúmedos, desde el nivel del mar hasta 1 100 m de altitud; hay, además, una pequeña área de	Desde el nivel del mar hasta los 1 100 m los climas son cálidos. Los semicálidos siguen en importancia en cuanto a extensión y se sitúan de

	clima semiseco en los llanos de Tecomán (zona litoral del río Armería al Coahuayana, Col.)	1 100 a 1 800 m de altitud en las laderas de la Sierra Madre del Sur. En la parte alta de las montañas se encuentran también climas templados (1 800 a 2 500 m) y semifríos (2 500 a 3 800 m). Los fríos y muy fríos se restringen a las partes altas del Volcán de Fuero y del Nevado (>3 800 m)
<b>Región Sureste</b>	Varían de húmedos a subhúmedos. En la parte del Istmo, la precipitación disminuye hacia la costa y a mayor altitud el clima presenta mayor humedad. Desde la Meseta a la Depresión Central de Chiapas, los climas subhúmedos de mayor humedad se encuentran en las partes más altas (> 2 000 m). En toda la Sierra Madre y la franja litoral, los climas son húmedos, con una pequeña franja subhúmeda en las laderas de la Sierra (50 a 1 000 m)	Varían de cálidos a semifríos, los fríos sólo se encuentran en la cúspide del Volcán del Tacaná. A pesar de que en el Istmo de Tehuantepec el relieve es bajo, ejerce una gran influencia en la distribución de la temperatura; en la parte más alta de la sierra de Niltepec se presentan climas semicálidos, y en la llanura cálidos. En la Meseta y Depresión Central de Chiapas, los climas más cálidos se encuentran en las partes bajas centrales. En la Sierra Madre los climas son templados a altitudes mayores a 2 000 m y semicálidos entre 1 000 y 2 000 m. Hacia la costa, a menores altitudes, los climas son los más cálidos de la región (entre 4 y 5° C más)
<b>Región Península de Yucatán</b>	Predominan los subhúmedos con régimen de lluvias en verano y con régimen intermedio, excepto a lo largo de una angosta franja del litoral norte de Yucatán en donde son secos	Cálidos en toda la región

Finalmente, los datos topográficos y geológicos corresponden a datos del INEGI (ver Figura 2.9). La juventud geológica destaca como uno de los rasgos más distintivos del territorio nacional, pues casi las tres cuartas partes de las provincias geológicas del país exponen, mayoritariamente, rocas de edad mesozoica o cenozoica, es decir, de los últimos 225 millones de años, mientras que las rocas del Precámbrico solamente afloran en cantidades substanciales en el 12% de ellas (Instituto de Geología, Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992). Otra característica distintiva de la geología de México es la distribución asimétrica de las provincias en cuanto a su origen, ya que en la mitad oriental del país están concentradas las provincias sedimentarias (de origen superficial), en tanto que en la mitad occidental están localizadas las provincias magmáticas y metamórficas (de origen profundo). Esta dicotomía tan clara de la geología mexicana se explica por el carácter pasivo que ha tenido la margen oriental de México, en contraste con lo convergente y activo que ha sido su margen occidental (*ibid.*).

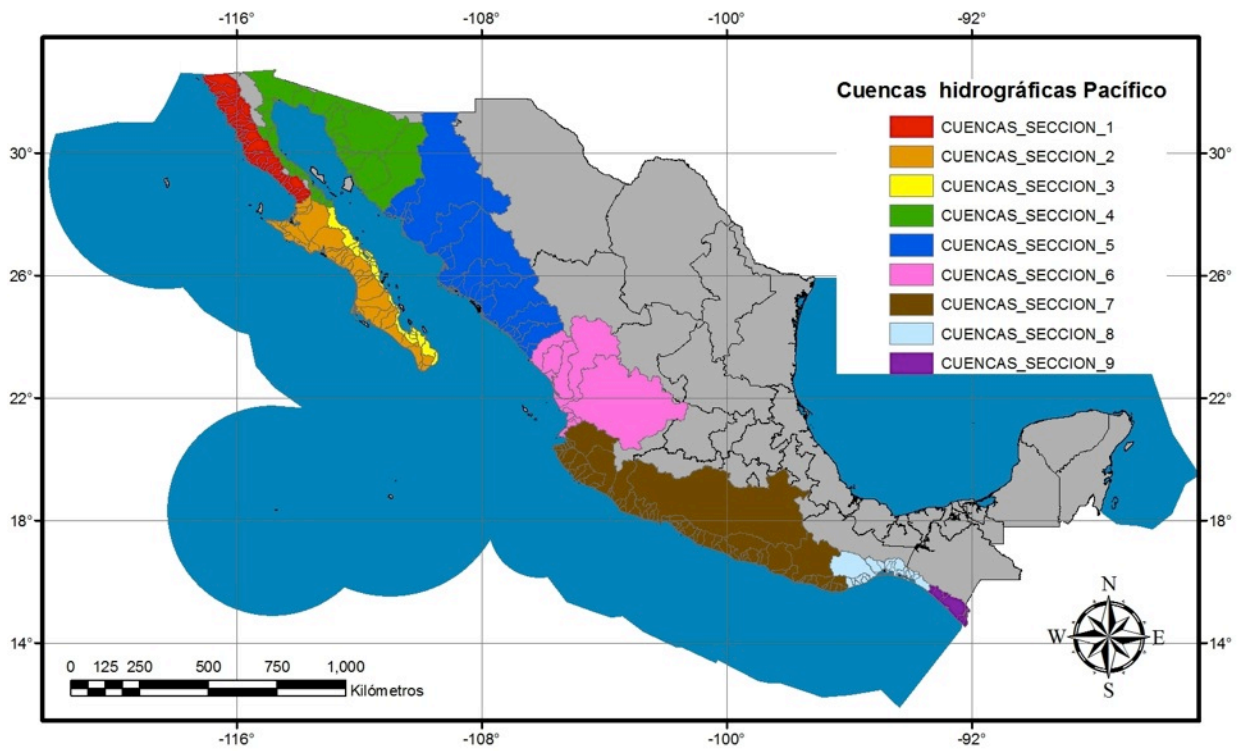


Figura 2.7 Cuencas hidrográficas del Pacífico mexicano (elaboración propia con datos de Cotler *et al.*, 2007)

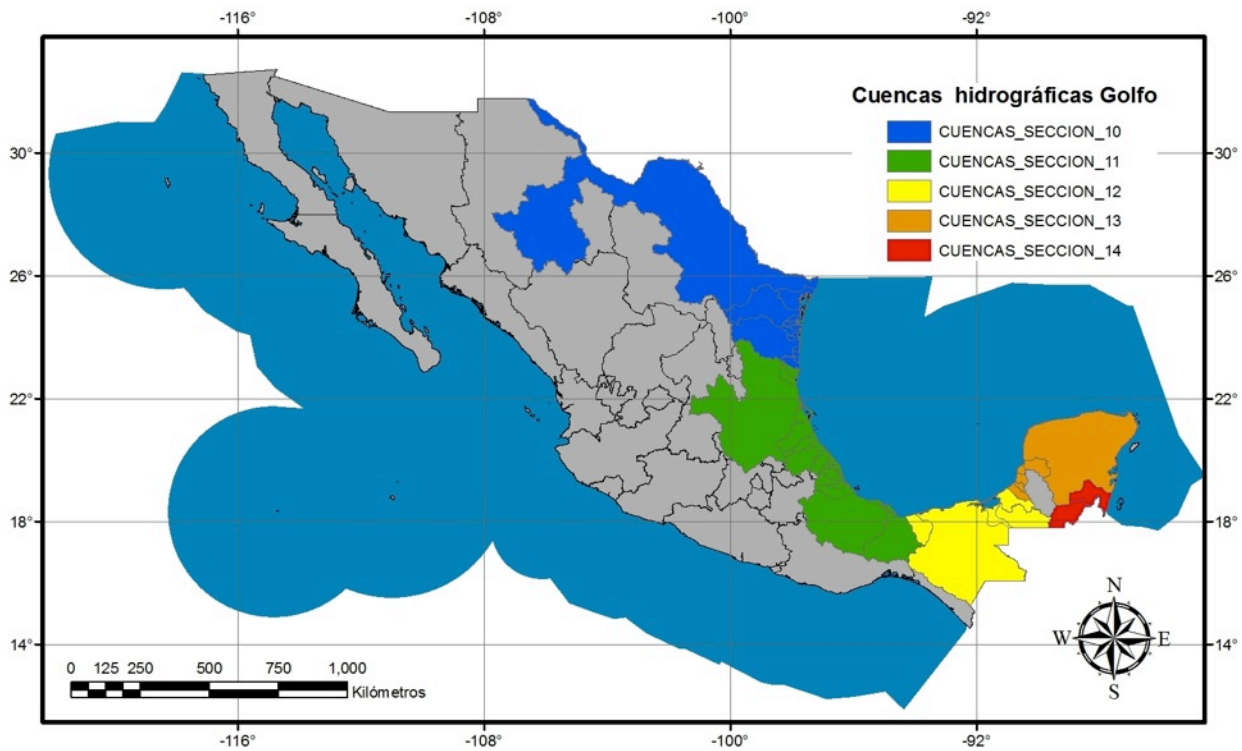


Figura 2.8 Cuencas hidrográficas del Golfo de México y Mar Caribe (elaboración propia con datos de Cotler *et al.*, 2007)

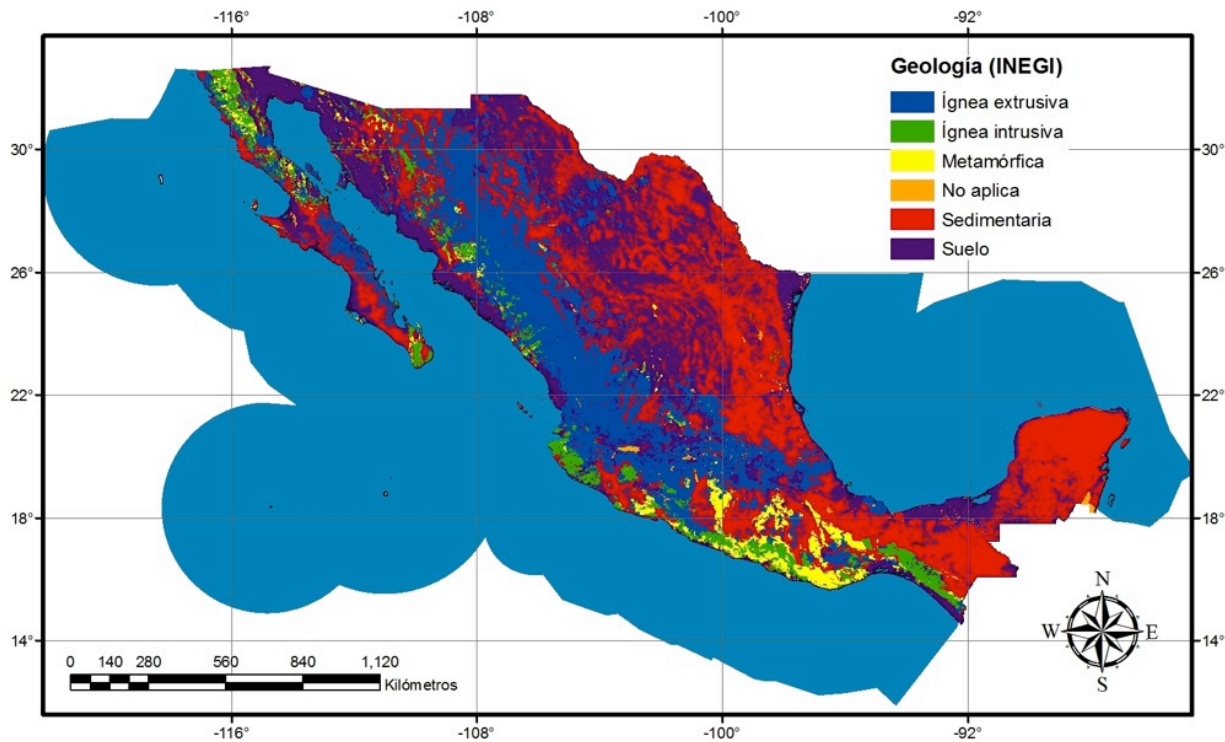


Figura 2.9 Geología de México (elaboración propia con datos del INEGI)

### 2.1.3. Caracterización hidrodinámica

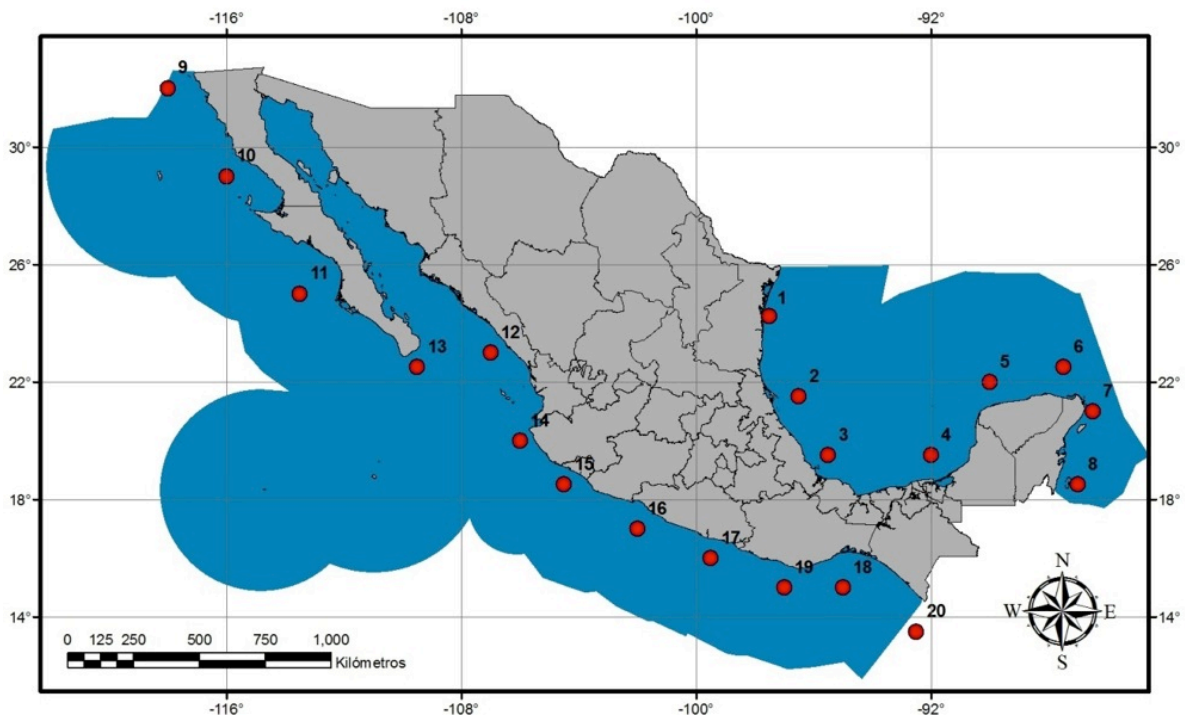
Los datos utilizados para la caracterización hidrodinámica corresponden al Atlas de Oleaje elaborado por el Grupo de Costas y Puertos de Instituto de Ingeniería (Silva *et al.*, 2008), en el caso del oleaje, y a datos del Servicio Mareográfico Nacional (UNAM), para las mareas.

#### Oleaje

El clima de oleaje a lo largo de las costas mexicanas es extremadamente variado. Para la realización de una adecuada caracterización de la costa, con base en sus características energéticas es necesario contar con información de oleaje y vientos registrados en campo con equipos adecuados por largos periodos de tiempo (años). No obstante lo importante que resulta este tipo de información, en México no se cuenta con registros adecuados y normalmente la única vía es el modelaje numérico. En este caso, los datos analizados se obtuvieron empleando el modelo híbrido (WAM-HURAC) compuesto por un modelo de tercera generación (WAM) y un modelo de segunda generación (HURAC). A pesar de que los datos modelados no son tan precisos como aquellos medidos directamente por boyas de oleaje, estos conforman una base de datos constante y completa que permite examinar las variaciones regionales.

El tratamiento de los datos generados por el modelo consistió en obtener, para cada celda de la malla, un fichero con la siguiente información: 1) fecha (año, mes, día y hora), 2) velocidad de viento ( $V_w$ ) en m/s sostenida en un promedio de 10 minutos a 10 msnm, 3) dirección de viento ( $\theta_w$ ), 4) altura de ola significativa en metros ( $H_s$ ), 5) dirección del oleaje ( $\theta_H$ ) y 6) periodo de pico espectral ( $T_p$ ) en segundos. Las direcciones son referidas al Norte. Debido al gran número de celdas que se obtuvieron para las dos vertientes (3 268 en la

atlántica y 4 680 en la pacífica), para los fines del presente libro se decidió mostrar a detalle solamente un resumen de la caracterización del régimen del oleaje para 20 celdas ubicadas en las coordenadas que se muestran en la Tabla 2.2 (Figura 2.10). De tal forma que a partir de la totalidad de los datos para cada una de estas celdas se obtuvieron, la altura media de ola ( $H_m$ ), la altura significante ( $H_s$ ), las alturas para períodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1000 años, el período medio ( $T_m$ ) y la dirección predominante de propagación del oleaje ( $\theta_{Hmoda}$ ). El Golfo de California no ha sido analizado, por lo que no hay puntos correspondientes a esta zona. Es importante considerar que dado que la información presentada en la Tabla 2.2 y en las siguientes figuras es para un número limitado de puntos a lo largo de la costa, ésta es general y puede variar en sitios específicos, dependiendo de factores tales como: variaciones en el nivel de exposición resultado de la orientación de la costa o de la presencia de islas que protejan una determinada sección de la costa; efectos de la batimetría (refracción, difracción, asomeramiento, rompiente de oleaje); interacciones con corrientes mareales y fluviales en bocanas y deltas; entre otras.



**Figura 2.10** Puntos para los cuales se analizaron los datos de oleaje correspondientes al período 1948-2009 (elaboración propia con datos de Silva *et al.*, 2008)

Utilizando los datos de (Silva *et al.*, 2008), de la Figura 2.11 a la Figura 2.14 se presentan los resultados de altura significativa media, periodo medio, rosa de oleaje y dirección de oleaje predominante para el periodo 1948-2009.

Los datos utilizados para clasificar la costa de acuerdo a su rango de mareas provienen de dos fuentes: el Servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM y de la red de mareógrafos del CICESE (ver Tabla 2.3). En el año de 1952, el Servicio Mareográfico del Instituto de Geofísica de la UNAM instaló las primeras estaciones mareográficas en México y a la fecha mantiene una red de estaciones en las costas del Golfo de México, el Caribe y la costa occidental de México. Desde el año de 1972, el Centro de

Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) mantiene una red de estaciones mareográficas en la Península de Baja California con el objetivo de obtener registros continuos del nivel del mar. Estas estaciones en conjunto con las estaciones mareográficas de la UNAM forman la red mareográfica nacional.

**Tabla 2.2 Coordenadas de las celdas analizadas**

Ver	Lon (°)	Lat (°)	Hm (m)	Hs (m)	Tm (s)	θHmoda (°N)	H 5 años (m)	H 10 años (m)	H 50 años (m)	H 100 años (m)	H 1000 años (m)	
Atlántica	1	-97.5	24.25	0.88	1.28	5.70	306	6.73	8.46	11.54	12.60	15.30
	2	-96.5	21.5	1.08	1.75	6.05	267.4	7.18	7.97	9.61	10.26	12.30
	3	-95.5	19.5	0.92	1.53	5.78	232.1	6.61	7.41	9.06	9.72	11.76
	4	-92	19.5	0.52	0.88	3.81	255.9	5.43	6.45	8.55	9.38	11.93
	5	-90	22	0.98	1.51	5.30	252.4	6.96	8.57	11.84	13.12	16.96
	6	-87.5	22.5	1.14	1.75	5.90	267.8	7.42	9.07	12.42	13.73	17.67
	7	-86.5	21	1.18	1.73	6.68	289.5	8.18	9.90	12.19	12.77	13.82
	8	-87	18.5	1.13	1.61	6.47	272.9	7.95	10.16	13.95	15.20	18.23
	9	-118	32	0.87	1.39	5.08	114.8	4.65	5.23	6.45	6.93	8.44
Pacífico	10	-116	29	0.92	1.36	5.48	122.2	5.81	6.46	7.34	7.56	7.98
	11	-113.5	25	0.91	1.31	5.71	131.1	8.75	9.55	10.71	11.02	11.63
	12	-107	23	0.50	0.76	3.37	88.2	10.12	10.84	11.81	12.06	12.50
	13	-109.5	22.5	0.71	1.04	4.76	108.8	10.12	10.76	11.59	11.79	12.14
	14	-106	20	0.64	0.94	5.03	119.8	10.66	11.31	12.14	12.34	12.69
	15	-104.5	18.5	0.63	0.95	5.19	115.8	10.61	11.28	12.14	12.34	12.69
	16	-102	17	0.62	0.95	4.83	101.8	10.14	10.89	11.87	12.11	12.53
	17	-99.5	16	0.60	0.94	4.35	97.2	9.42	10.29	11.49	11.80	12.38
	18	-95	15	0.49	0.79	3.87	66.2	7.34	8.44	10.16	10.68	11.82
	19	-97	15	0.54	0.86	4.24	96.6	8.35	9.28	10.57	10.91	11.55
	20	-92.5	13.5	0.62	1.00	3.85	84.2	6.08	7.27	9.66	10.57	13.26

Donde Ver = Vertiente, Lon = longitud, Lat = Latitud, Hm = altura de ola media, Hs = altura de ola significativa, Tm = periodo de ola medio. H 5 años, H 10 años, H 50 años, H 100 años y H 1000 años son la máxima altura de ola (m) calculada para un período de retorno de 5, 10, 50, 100 y 1 000 años, respectivamente.

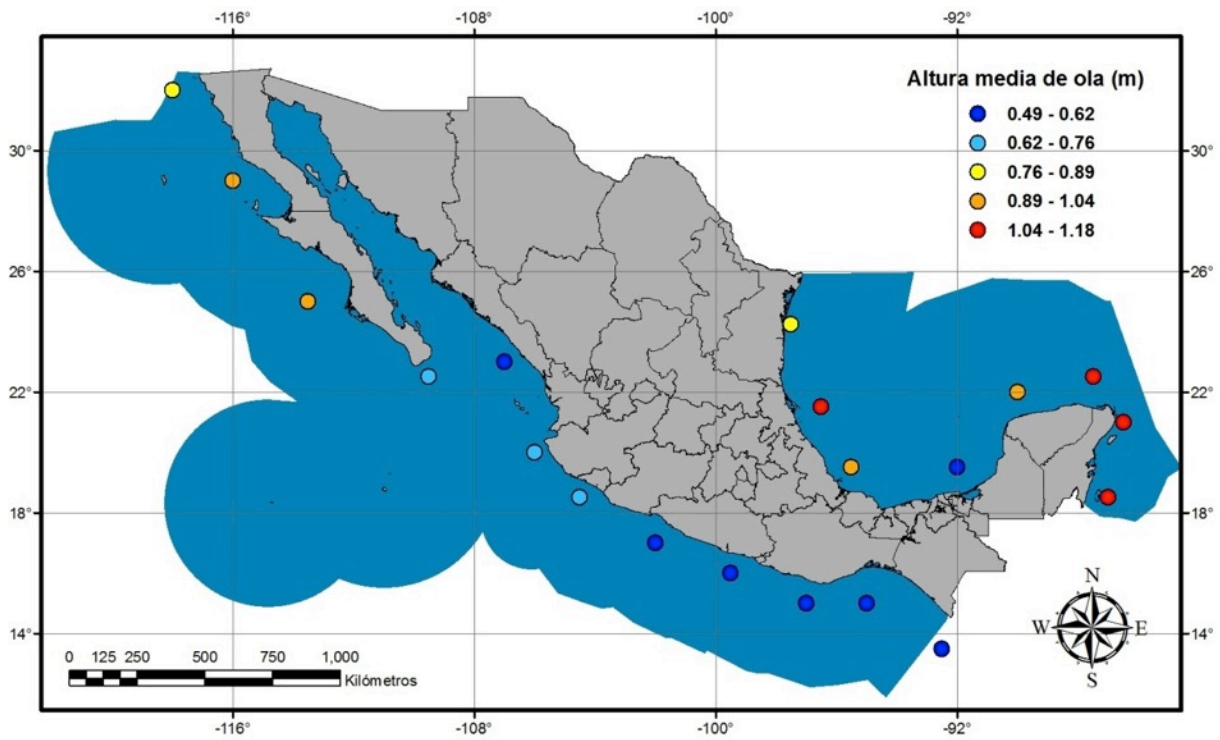


Figura 2.11 Altura media de ola ( $H_m$ ) en metros, calculada para cada punto para el período 1948-2009 (elaboración propia con datos de Silva *et al.*, 2008)

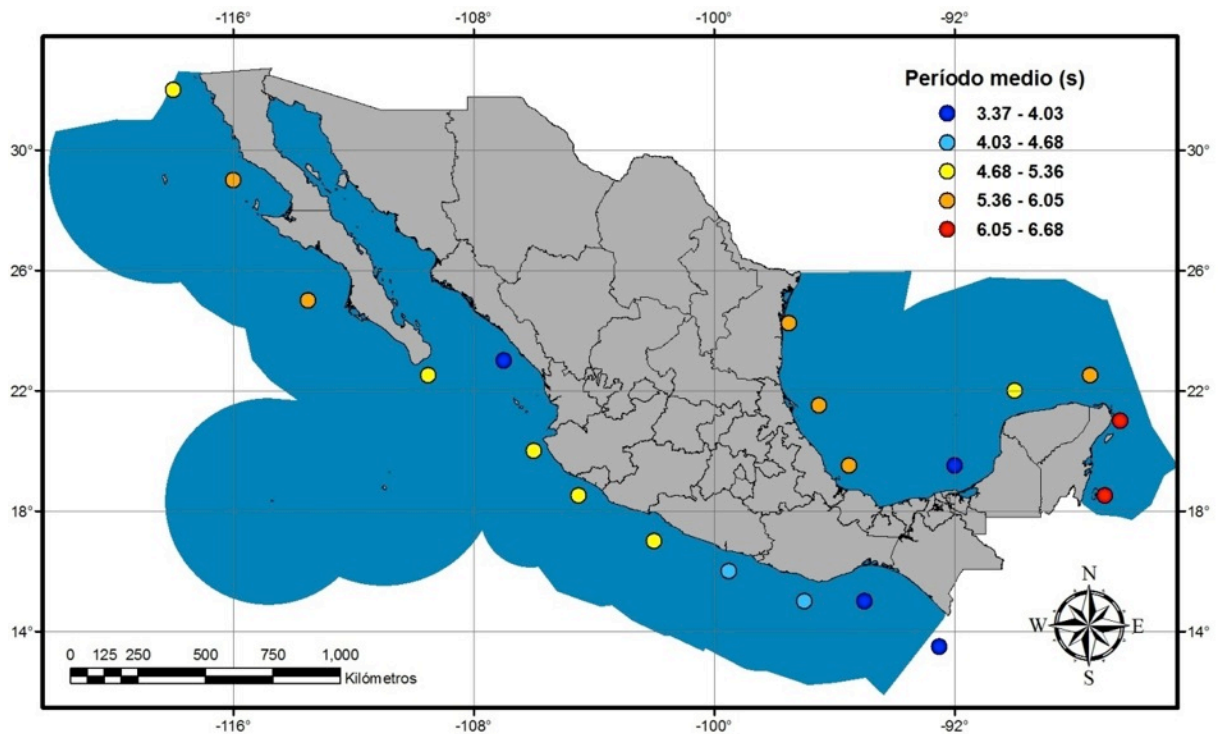


Figura 2.12 Período medio de ola ( $T_m$ ) en segundos, calculado para cada punto para el período 1948-2009 (elaboración propia con datos de Silva *et al.*, 2008)



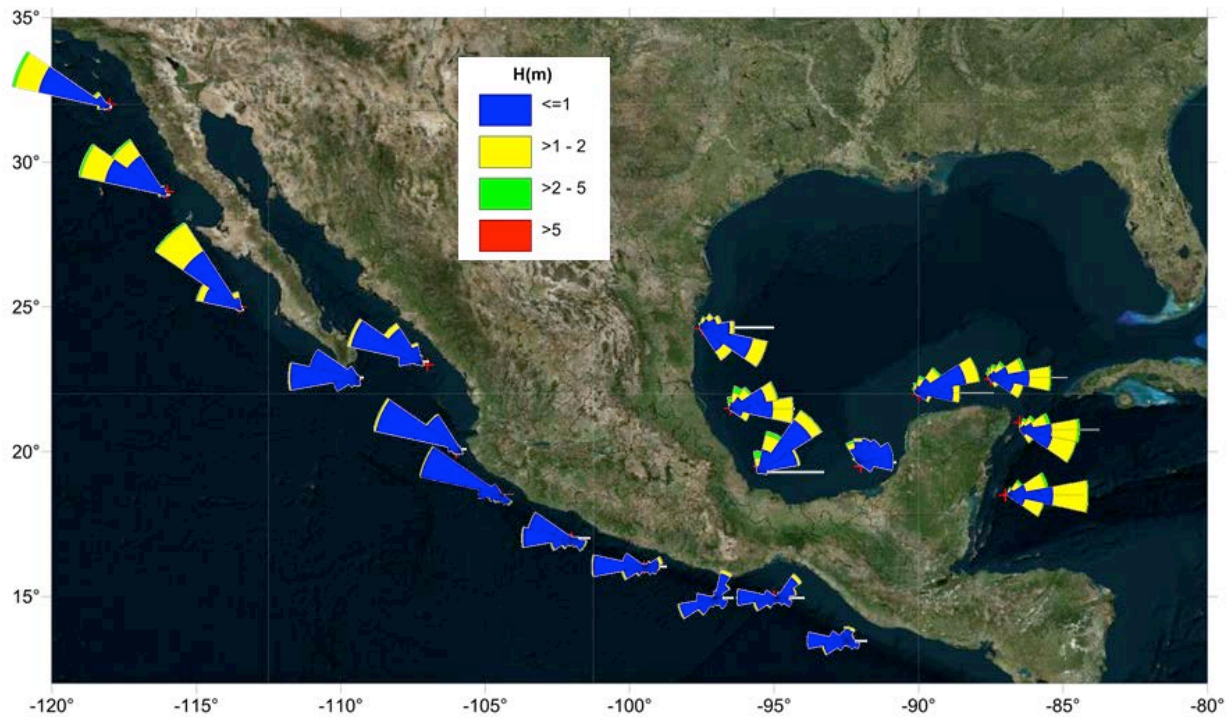


Figura 2.13 Rosa del oleaje, calculado para el período 1948-2009 (elaboración propia con datos de Silva *et al.*, 2008)

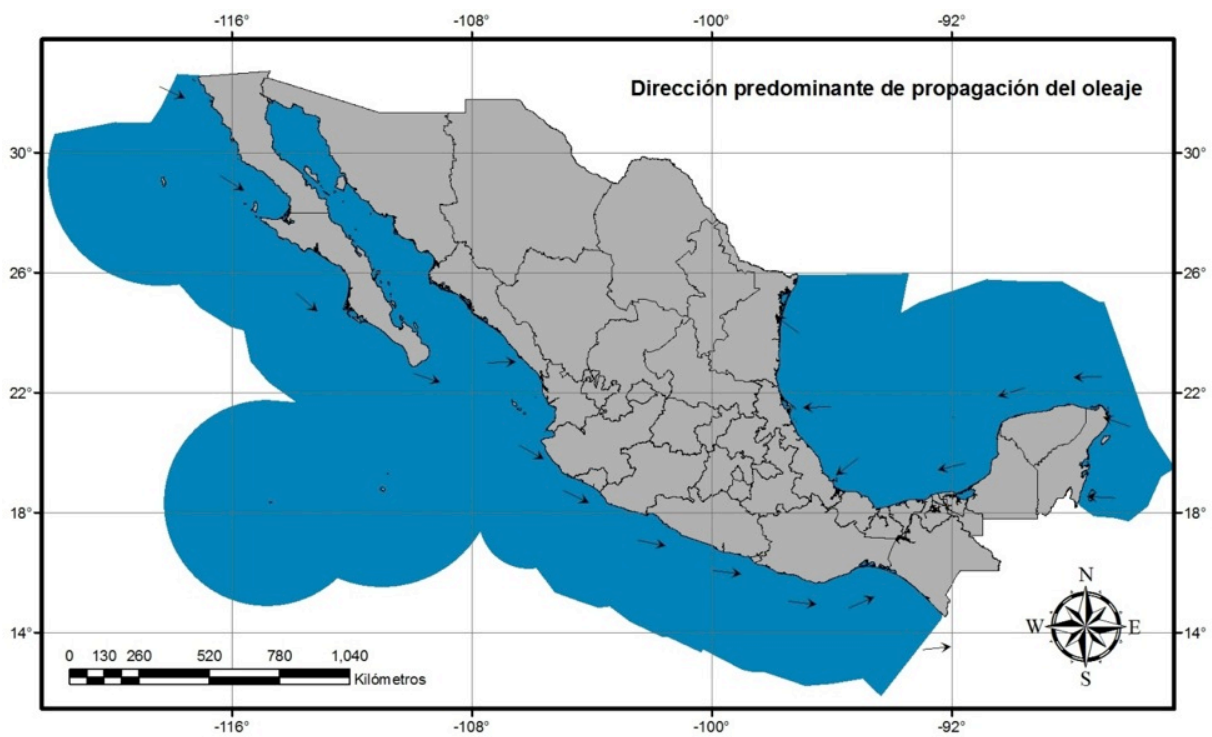


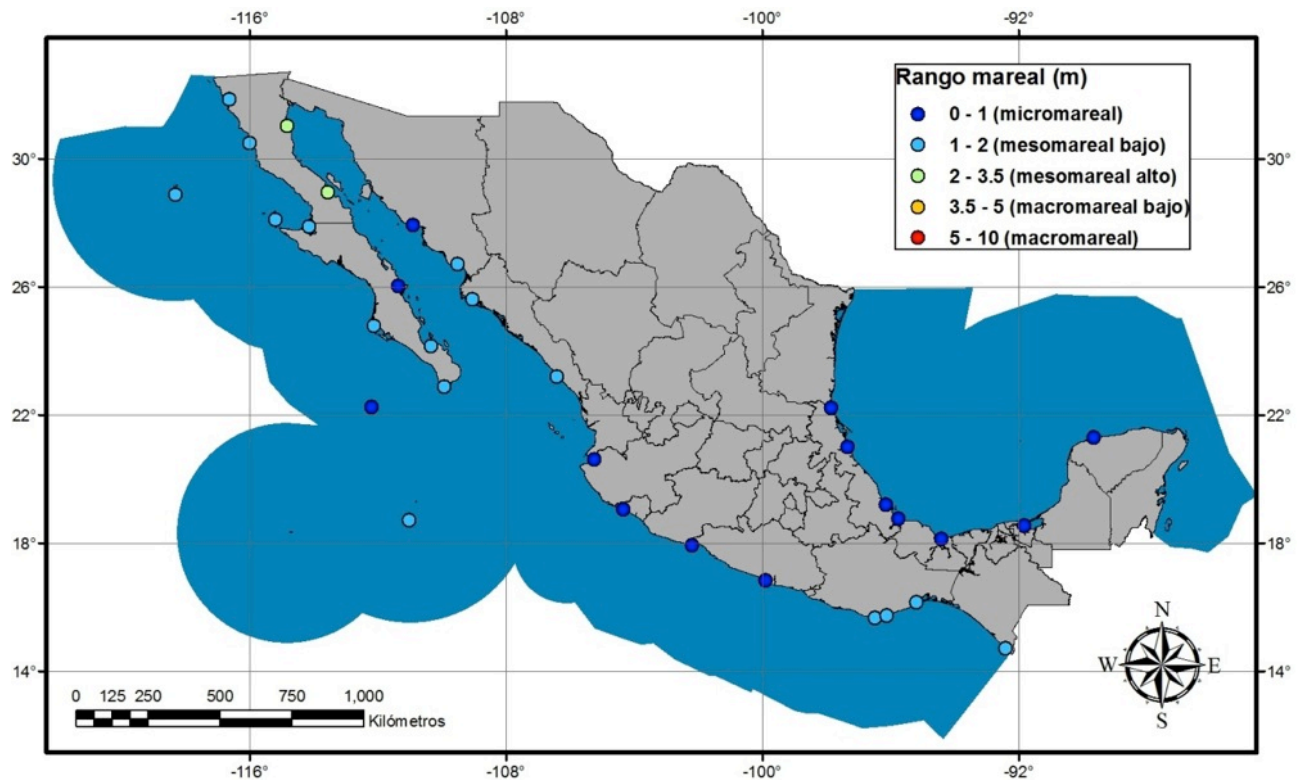
Figura 2.14 Dirección predominante de propagación del oleaje ( $\theta_{Hmoda}$ ), calculada para el período 1948-2009 (elaboración propia con datos de Silva *et al.*, 2008)

Marea

El rango mareal para cada sitio se calculó a partir de la diferencia entre las pleamares y bajamares. Las pleamares y las bajamares pueden ser identificadas por la comparación de alturas consecutivas, correspondiendo las pleamares a las de mayor valor y viceversa. El rango de marea se puede dividir de acuerdo a la clasificación de Hayes (1979), mostrado en la Tabla 2.4 y Figura 2.15.

**Tabla 2.3 Clasificación de los rangos de marea propuesta por Hayes (1979)**

Clasificación	Rango
micromareal	< 1 m
mesomareal bajo	1 - 2 m
mesomareal alto	2 - 3.5 m
macromareal bajo	3.5 - 5 m
macromareal alto	> 5 m



**Figura 2.15 Rango mareal (m) calculado a partir de datos medidos por mareógrafos de la SEMAR y del CICESE (elaboración propia con datos de la Red Mareográfica Nacional)**

**Tabla 2.4 Datos de marea obtenidos y procesados para la caracterización hidrodinámica**

Lugar	Pleamar media sup (m)*	Bajamar media inf (m)**	Rango Marea (m)	Tipo	Fuente	Período	Hayes (1979)
Ensenada	0.781	-0.822	1.603	Mixta semidiurna	UNAM	ene 57 - dic 75	mesomareal bajo
Sn Quintín, B.C.	0.807	-0.821	1.628	Mixta semidiurna	CICESE	jun 77 - nov 89	mesomareal bajo
Isla Gpe., B.C.	0.698	-0.7	1.398	Mixta semidiurna	CICESE	jul 77 - dic 85	mesomareal bajo
Isla Cedros, B.C.	0.811	-0.824	1.635	Mixta semidiurna	CICESE	jul 76 - dic 85	mesomareal bajo
Gro. Nedro, B.C.	0.633	-0.645	1.278	Mixta semidiurna	CICESE		mesomareal bajo
Sta. Rosalía, B.C.	0.143	-0.34	0.483	Diurna	CICESE		micromareal
Bahía de los ángeles, B.C.	0.99	-1.018	2.008	Semidiurna	CICESE	ene 75 - nov 88	mesomareal alto
San Felipe, B.C.	1.777	-1.707	3.484	Semidiurna	CICESE		mesomareal alto
San Carlos, B.C.S.	0.833	-0.868	1.701	Mixta semidiurna	UNAM	ene 74 - dic 76	mesomareal bajo
Cabo S. L., B.C.S.	0.585	-0.609	1.194	Mixta semidiurna	CICESE	jun 74 - nov 88	mesomareal bajo
La Paz, B.C.S.	0.509	-0.536	1.045	Mixta semidiurna	UNAM	ene 52 - dic 71	mesomareal bajo
Loreto, B.C.S	0.374	-0.442	0.816	Mixta semidiurna	UNAM	may 75 - nov 88	micromareal
Guaymas, Son.	0.357	-0.474	0.831	Diurna	UNAM	ene 52 - dic 73	micromareal
Yavaros, Son.	0.463	-0.572	1.035	Mixta semidiurna	UNAM	mar 69 - feb 70	mesomareal bajo
Topolobmapo, Sin.	0.528	-0.61	1.138	Mixta semidiurna	UNAM	mar 56 - dic 66	mesomareal bajo
Mazatlán, Sin.	0.548	-0.616	1.164	Mixta semidiurna	UNAM	ene 53 - dic 71	mesomareal bajo
Puerto Vallarta, Jal.	0.48	-0.512	0.992	Mixta semidiurna	UNAM	ene 75 - dic 78	micromareal
Isla Socorro, Col.	0.533	-0.534	1.067	Mixta semidiurna	UNAM	mar 57 - jun 59	mesomareal bajo

<b>Manzanillo, Col.</b>	0.333	-0.398	0.731	Mixta semidiurna	UNAM	ene 54 - dic 73	micromareal
<b>Lázaro Cárdenas, Mich.</b>	0.534	0	0.534	Mixta semidiurna	UNAM	feb 99 - oct 99	micromareal
<b>Acapulco, Gro.</b>	0.342	-0.306	0.648	Mixta semidiurna	UNAM	ene 52 - dic 71	micromareal
<b>Puerto Ángel, Oax.</b>	0.546	-0.477	1.023	Mixta semidiurna	UNAM	ene 69 - dic 78	mesomareal bajo
<b>Santa Cruz Huatulco, Oax.</b>	1.022	0	1.022	Mixta semidiurna	UNAM	feb 99 - oct 99	mesomareal bajo
<b>Salina Cruz, Oax.</b>	0.645	-0.574	1.219	Mixta semidiurna	UNAM	may 52 - dic 71	mesomareal bajo
<b>Puerto Madero, Chis.</b>	0.775	-0.693	1.468	Mixta semidiurna	UNAM	mar 85 - jun 86	mesomareal bajo
<b>Cd. Madero, Tamps.</b>	0.208	-0.262	0.47	Mixta diurna	UNAM	abr 62 - may 75	micromareal
<b>Tuxpan, Ver.</b>	0.219	-0.284	0.503	Mixta diurna	UNAM	ago 59 - jul 68	micromareal
<b>Veracruz, Ver.</b>	0.221	-0.301	0.522	Mixta diurna	UNAM	ene 53 - dic 71	micromareal
<b>Alvarado, Ver.</b>	0.161	-0.234	0.395	Diurna	UNAM	ene 55 - dic 63	micromareal
<b>Coatzacoalcos, Ver.</b>	0.199	-0.28	0.479	Mixta diurna	UNAM	ene 47 - dic 71	micromareal
<b>Cd. del Carmen, Camp.</b>	0.18	-0.244	0.424	Mixta diurna	UNAM	ene 57 - dic 77	micromareal
<b>Progreso, Yuc.</b>	0.259	-0.308	0.567	Diurna	UNAM	ene 52 - dic 70	micromareal

\*NIVEL DE PLEAMAR MEDIA SUPERIOR (MHHW): promedio de la más alta de las dos pleamars diarias, durante el período considerado en cada estación.

\*\*NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR (MLLW): promedio de la más baja de las dos bajamars diarias, durante el período considerado en cada estación. Este plano es el que se utiliza como plano de referencia para el pronóstico de mareas en la costa del Pacífico y Golfo de California, mismo que utiliza el National Oceanographic Service.

#### 2.1.4. Caracterización ecológica

Con base en la clasificación de ecosistemas costeros presentada en El Capital Natural de México (Sarukhán *et al.*, 2009) y datos de CONABIO, se identificaron los siguientes ecosistemas costeros a lo largo del litoral mexicano: a) manglares y pastos marinos, b) humedales, c) dunas, d) lagunas costeras, e) macroalgas, y f) arrecifes. Estos ecosistemas, descritos a continuación, son de suma importancia pues prestan una serie de servicios de gran valor económico y ecológico (Tabla 2.5).

- a) Manglares y pastos marinos (p.e. Figura 2.16)
  - En la mayoría de las lagunas costeras, bahías y estuarios del litoral mexicano se encuentran estos dos tipos de planta vascular, las hidrófitas enraizadas sumergidas conocidas como “pastos marinos”, frecuentemente consideradas un alga de forma errónea (Dawes, 1998), y la vegetación arbórea circundante conocida como manglar (Ramírez García y Lot, 1994).

Tabla 2.5 Servicios de los ecosistemas (Sarukhán *et al.*, 2009)

<p><b>Servicios de provisión o abastecimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentos</li> <li>• Agua dulce</li> <li>• Madera y fibras</li> <li>• Combustibles</li> </ul>	<p><b>Servicios de regulación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Del clima (protección contra eventos extremos, como inundaciones)</li> <li>• Control de erosión</li> <li>• Regulación de polinizadores</li> <li>• Enfermedades</li> <li>• Purificación del agua</li> </ul>	<p><b>Servicios culturales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estéticos</li> <li>• Espirituales</li> <li>• Recreativos</li> <li>• Educativos</li> </ul>
<p><b>Servicios de soporte ecológico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de nutrientes</li> <li>• Formación de suelo</li> <li>• Productividad primaria</li> </ul>		

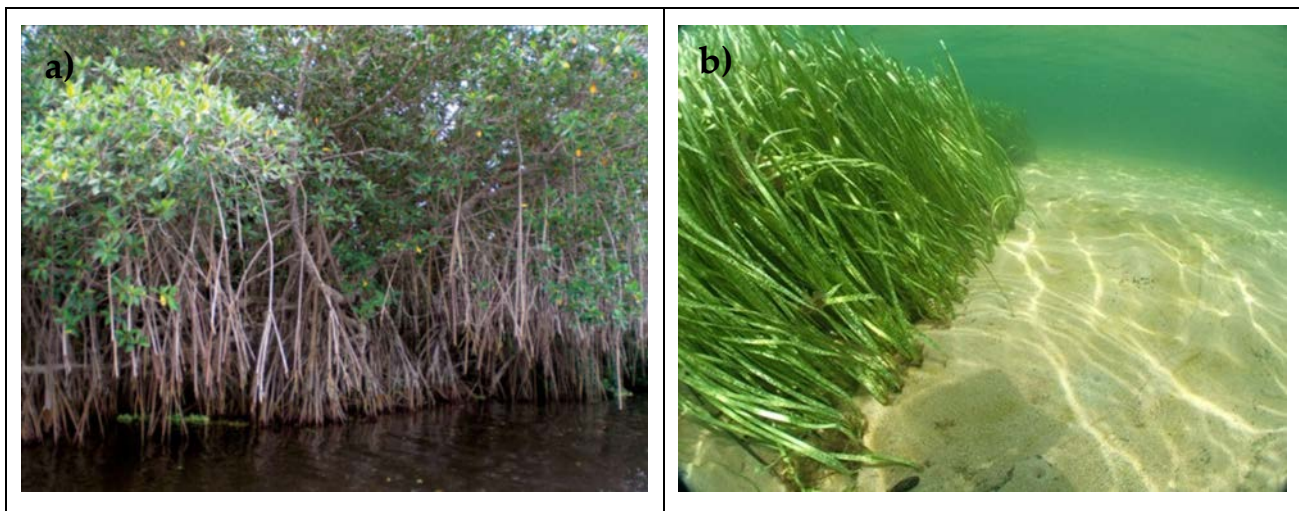


Figura 2.16 a) Mangle rojo en Alvarado, Veracruz (CONABIO, 2008) y b) pasto marino ([www.forgreenarchitect.com](http://www.forgreenarchitect.com))

- Seis de los 12 géneros de pastos marinos en el mundo, se encuentran en las costas de México. De estos, la mayoría prefieren condiciones someras, de calma y baja turbidez, aunque algunas especies, como *Zostera* y *Phyllospadix* habitan en zonas donde la velocidad de las corrientes marinas es muy alta y la temperatura es baja, como la costa Nororiental de Baja California, en el primer caso, y a lo largo de toda la Península de Baja California, en el segundo. Los pastos marinos del género *Phyllospadix* son los únicos que crecen en sustratos rocosos de alta energía del oleaje y abarcan desde el infralitoral hasta el supralitoral, distribuyéndose en aguas frías a templadas (por debajo de los 27°C) (Ramírez-García *et al.*, 2002).
- En cuanto a los manglares, se estima que existen 655 657 hectáreas de manglar en México, donde predominan 4 especies *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Laguncularia racemosa* (mangle

blanco), *Avicennia germinans* (mangle negro, madre de sal) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) (CONABIO, 2008). Además se han registrado *Rizophora harrisoni* y *Avicennia bicolor*, (CONABIO, 2009).

- Estos ambientes costeros son cruciales para el mantenimiento de las poblaciones de la mayor parte de los peces de interés económico para la pesca ribereña (practicada por pescadores individuales, en buena parte para su subsistencia) y de la pesca industrializada (Sarukhán *et al.*, 2009).
- Dado que están asociados a costas de baja elevación, son también de particular importancia como barrera natural ante las inundaciones costeras por fenómenos hidrometeorológicos o inclusive geológicos, como los tsunamis, como se demostró durante el evento de Indonesia en 2005.

b) Humedales (p.e. Figura 2.17)

- Son superficies terrestres que, por su baja elevación, se caracterizan por estar permanentemente o temporalmente inundadas con aguas poco profundas corrientes o estancadas, que pueden ser dulces, salobres o salina. Se asocian a ambientes con bajos niveles de energía en términos de oleaje, aunque pueden darse en zonas con rangos mareales grandes o pequeños.
- Existen 67 humedales en México de prioridad natural, destacan Ría Lagartos en Yucatán, pantanos de Centla en Tabasco y Marismas Nacionales en Sinaloa y Nayarit.
- Es el principal abastecedor de agua potable en zonas costeras.
- La totalidad de servicios ambientales prestados por los humedales han sido valuados en 14 millones de dólares anuales, derivando en su designación como áreas de gran importancia ecológica en la convención de Ramsar, en 1971.

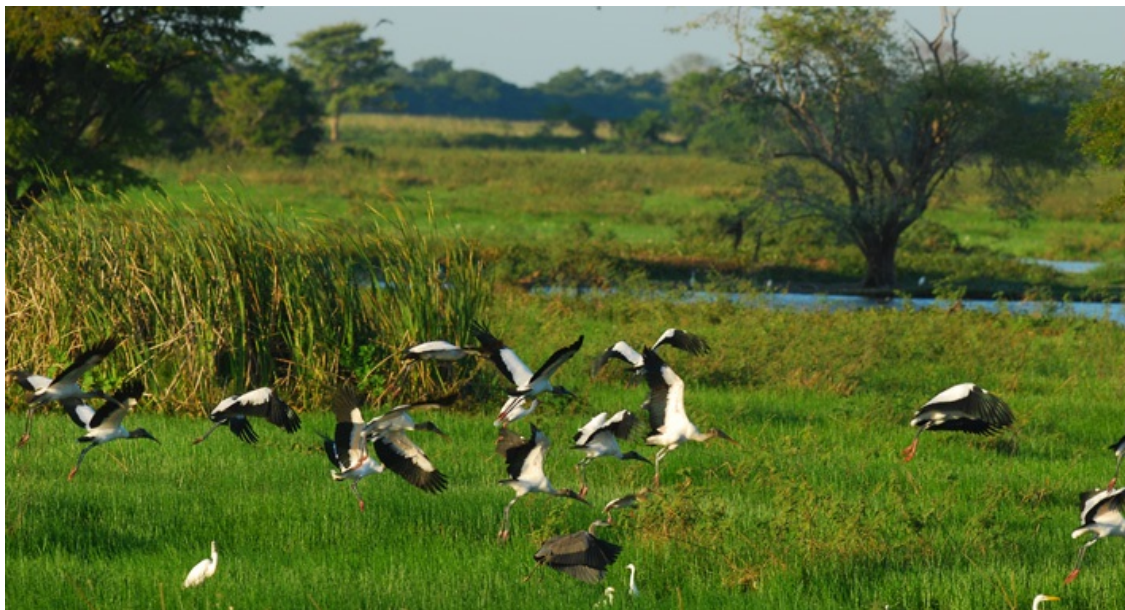


Figura 2.17 Pantanos de Centla ([www.rosavientos.es](http://www.rosavientos.es))

## c) Dunas

- Las dunas son un ambiente costero que resulta del transporte eólico de arena de las playas hacia tierra adentro. El tamaño (cantidad de dunas) del sistema de dunas depende principalmente de la disponibilidad de arena para alimentar/formar el sistema.
- Son particularmente importantes por su riqueza ecológica y porque actúan, al igual que los manglares, como barrera natural ante las inundaciones por eventos hidrometeorológicos, además de actuar como regulador de arena para la playa después de tormentas, permitiendo que ésta recupere forma y volumen.
- Se distinguen tres tipos de dunas (ver Figura 2.18):
  1. las incipientes, con material no consolidado y poca vegetación, que se desarrollan cuando hay abundancia de arena y el sistema está en fase de acreción;
  2. la duna frontal o primaria, conformada por arena silíceo o calcárea no consolidada, de color amarillo o blanco pues casi no contiene materia orgánica. No presenta un suelo como tal. En este tipo de duna, cuando existe vegetación, por lo general se conforma de pastos y vegetación de tipo rastrera (colonizadoras) y la mayor cantidad de éstas se observan en la cresta de la duna. Esta duna está sujeta al embate del oleaje durante tormentas.
  3. Las dunas secundarias y terciarias se distinguen por una mayor cantidad de materia orgánica (presencia de un suelo desarrollado), dándoles un color grisáceo. Estas dunas son más estables y presentan vegetación más desarrollada y estabilizada como arbustos o matorral costero, o inclusive árboles en el caso de sistemas muy desarrollados y de gran extensión.
- Para una descripción más detallada de este tipo de ecosistemas, incluyendo regulaciones específicas aplicables a tal ambiente, se recomienda consultar el documento Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias, (Pedroza *et al.*, 2013)

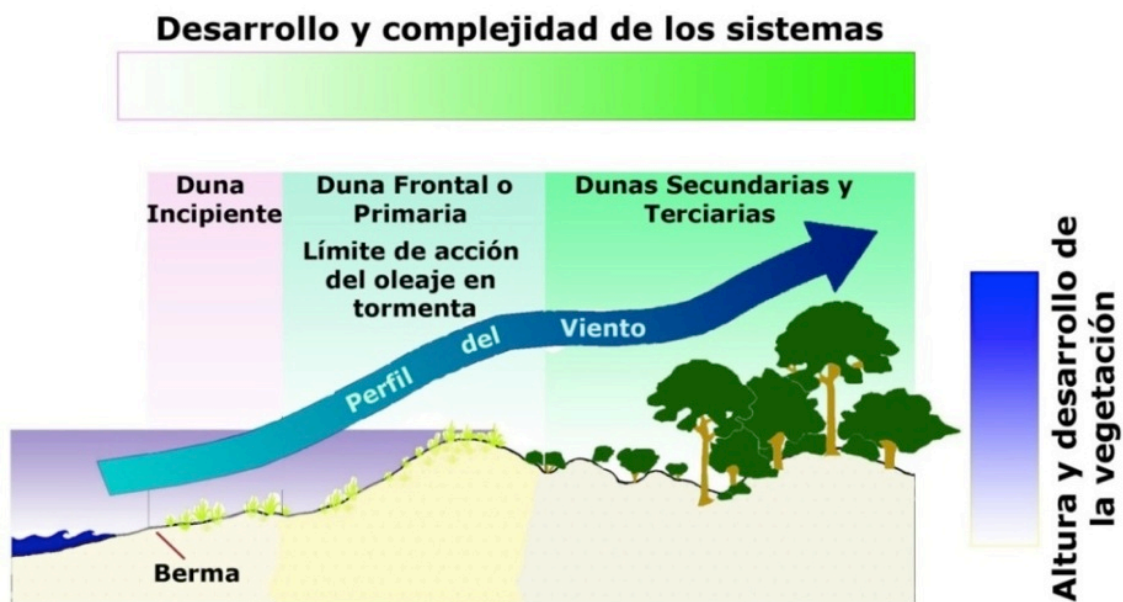


Figura 2.18 Esquema de un sistema de dunas

## d) Lagunas y estuarios (origen marino deposicional, p.e. Figura 2.19 )

- Los sistemas acuáticos epicontinentales, aunque de relativamente poco significado en términos de extensión, son muy importantes porque contienen especies de fauna endémica, especialmente de peces, pero además son de gran relevancia en el ciclo hidrológico de las diferentes regiones del país (Sarukhán *et al.*, 2009).
- Están asociados a costas de baja elevación y se pueden encontrar en una gran diversidad de condiciones hidrodinámicas (tanto oleaje, como marea).
- Se estima que existen 16 000 km<sup>2</sup> de zona estuarina y más de 12 000 km<sup>2</sup> de lagunas costeras (ibid.).
- De acuerdo a CONABIO (2011), existen 125 lagunas costeras, lo que corresponde al 33% del litoral mexicano.



**Figura 2.19 Laguna de Términos, Campeche (GoogleEarth®)**

## e) Macroalgas (p.e. Figura 2.20)

- En el contexto de este estudio se considera como macroalga a todo tipo de alga multicelular, como el kelp, sargazo, lechuga de mar, etc.
- Las macroalgas juegan un papel importante en la formación de los arrecifes coralinos, pues sirven de alimento a peces e invertebrados, modifican los fondos marinos al fijar sustratos por medio de sus raíces, enriquecen las aguas con oxígeno y aportan nutrientes (González Gándara *et al.*, 2007).
- Además, con frecuencia son la base de otros ecosistemas de gran importancia, particularmente en aquellas costas influenciadas por aguas frías, ricas en nutrientes (debido a surgencias) y en cuerpos costeros semicerrados como lagunas costeras, bahías y golfos.
- La gran diversidad de estos ecosistemas se manifiesta en el número de especies, existiendo 514 en el Caribe y Golfo de México (González Gándara *et al.*, 2007) y conociéndose al menos



55 especies con potencial comercial en el Golfo de California y un número similar en las costas del Pacífico de la Península de Baja California (Sarukhán *et al.*, 2009).



Figura 2.20 Ejemplos de a) bosque de kelp ([www.informador.com.mx](http://www.informador.com.mx)) y b) lechuga de mar ([www.makebiofuel.co.uk](http://www.makebiofuel.co.uk))



Figura 2.21 Arrecife de coral frente a Cabo Pulmo ([www.jornada.unam.mx](http://www.jornada.unam.mx))

f) Arrecifes (p.e. Figura 2.21)

- Los arrecifes coralinos son formaciones particularmente biodiversas que se desarrollan en la parte marina de las regiones costeras. Se encuentran en un rango amplio de condiciones

hidrodinámicas en términos de oleaje, aunque no se encuentran en zonas con rangos mareales grandes o altos niveles de turbidez.

- Los ambientes de fondos rocosos también son substrato donde se llegan a desarrollar las comunidades de arrecifes de roca, (Castañeda *et al.*, 2007).
- Representan el ambiente costero de mayor riqueza biológica y tienen gran influencia en la reproducción y protección de fauna marina muy importante (Sarukhán *et al.*, 2009).
- En México se conocen tres zonas de arrecifes coralinos: la costa del Pacífico (algunos estados costeros y las Islas Mariás y Revillagigedo), las costas de Veracruz y Campeche en el Golfo de México, y la costa este de la península de Yucatán donde se encuentra el Sistema Arrecifal Mesoamericano, la segunda barrera arrecifal más grande del mundo, compartida con Belice y Guatemala.
- Se estima que el área de arrecifes coralinos en México es de 1 780 kilómetros cuadrados (Spalding *et al.*, 2001).

## 2.2. Clasificación de las costas

El análisis regional para clasificar la costa en mayor detalle se realizó a partir de las características identificadas en la sección previa y algunos aspectos morfológicos ilustrados en la Figura 2.22,, lo que permitió hacer una clasificación por tipos de costa (Figura 2.23), por geodinámica costera (Figura 2.30) y por proceso dominante (Figura 2.32). La clasificación a esta escala (1:250 000) incluyó también la evaluación de cambios en la costa a través de imágenes satelitales, fotografías aéreas de diversas fechas y verificación de campo.

### 2.2.1. Clasificación por tipo de costa

El tipo de costa está intrínsecamente relacionado con su origen en términos geológicos o con el mecanismo generador. Una de las clasificaciones más usadas es la de Shepard (1973), que considera solamente las características morfológicas y ecológicas de la costa y está descrita en detalle en el Manual de Ingeniería Costera (CERC, 2000). Esta clasificación divide las costas del mundo en: a) primarias, formadas por agentes no marinos; y b) secundarias, formadas por procesos marinos.

- Costas primarias (Procesos no marinos)
  - a. Costas erosivas. Formadas por erosión y por incremento del nivel del mar.
    - i. Costas ria (valles fluviales inundados)
      1. Dendrítica (patrón erosional fluvial dendrítico en áreas horizontales y de sedimento homogéneo)
      2. Trellis o enrejado (patrón erosional fluvial en áreas con pendiente o consolidación no homogénea)
    - ii. Costas glaciales erosionales inundadas (profundas y con numerosas islas)
      1. Fiordos (entradas angostas bordeadas por costas montañosas)
      2. Valles glaciales (entradas anchas)
    - iii. Costas 'karst' inundadas (bahías con depresiones en forma oval)
  - b. Costas deposicionales subaéreas.
    - i. Depositación fluvial

1. Costas deltáicas
2. Costas deltáicas compuestas (serie de deltas continuos)
3. Abanicos aluviales compuestos sujetos a erosión por oleaje
- ii. Depositación glacial
  1. Morrenas parcialmente sumergidas
  2. 'Drumlins' sumergidos parcialmente
  3. Características de deriva parcialmente sumergidas
- iii. Depositación eólica
  1. Dunas progradacionales (donde las dunas han avanzado más allá de la playa, hacia el mar)
  2. Dunas (donde las dunas están bordeadas por una playa)
  3. Dunas relictas (depósitos antiguos)
- iv. Costas deposicionales por avalancha
- c. Costas volcánicas
- Costas secundarias (formadas por procesos marinos y colonizadas por organismos)
  - a. Costas erosivas por oleaje
    - i. Costas rectas (acantilados)
    - ii. Costas irregulares (donde el oleaje ha creado numerosas bahías y salientes)
  - b. Costas marinas deposicionales
    - i. Costas de barrera
      1. Playas de barrera (barra única)
      2. Islas barrera (varias barras, dunas)
      3. Flechas (conectadas a tierra)
      4. Barreras cerradas (cortan la comunicación con el océano totalmente)
    - ii. Cabos (salientes pronunciadas)
    - iii. Planicies costeras (difieren de las barreras por no tener laguna adyacente)
    - iv. Pantanos y esteros (formados a lo largo de costas deltáicas u otras costas de baja elevación)
  - c. Costas colonizadas por organismos
    - i. Arrecifes de coral
    - ii. Manglares
    - iii. Pastos marinos

De acuerdo a esta clasificación, los tipos de costas que se pueden observar a lo largo del litoral de nuestro país son: del tipo 1 (procesos no marinos), costas erosivas, como las costas de ría, y costas deposicionales, como las deltáicas y las que presentan grandes campos de dunas; del tipo 2 (procesos marinos), costas erosivas rectas (acantilados), costas deposicionales como las costas de barrera, y costas colonizadas por organismos como arrecifes de coral, manglares y pastos marinos (ver Figura 2.22). Se puede observar, que la mayoría de estos corresponden al tipo 2, es decir son costas generadas (y modificadas) por procesos marinos.

Tomando como base la clasificación por mecanismo generador y la clasificación propuesta por Ortiz y Méndez (2004), se propone una clasificación geomorfológica simplificada donde se divide los tipos de costa

de acuerdo a su proceso de formación: a) costa erosiva (rocosa y sedimentaria), b) costa erosiva-deposicional (mixta), y c) costa deposicional (baja arenosa) (ver Figura 2.23).



Figura 2.22. Tipos de costas que existen en México

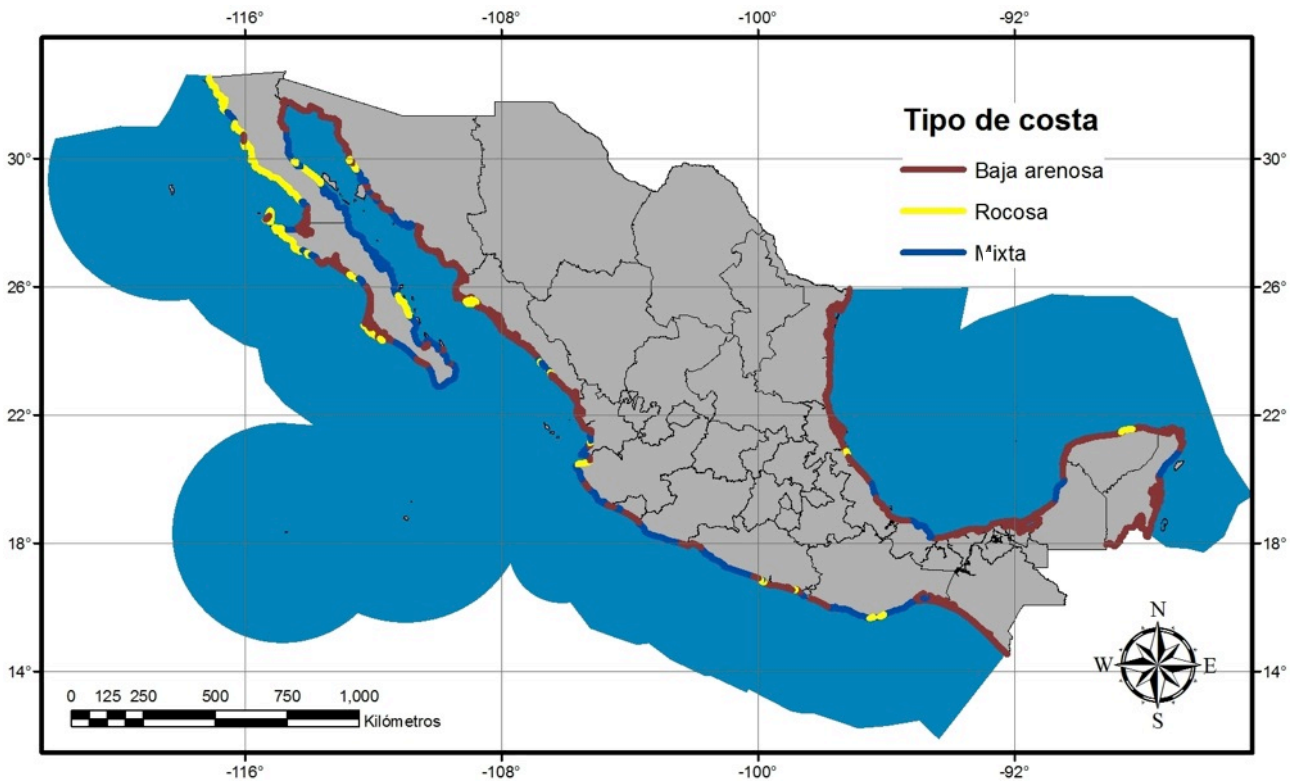


Figura 2.23 Tipos de costas (Rocosa, Bajas arenosas y Mixtas) (elaboración propia con datos del Instituto de Geografía)

La mayor parte del litoral mexicano presenta costas bajas arenosas, cuyos rasgos geomorfológicos distintivos son las playas, islas de barrera y deltas; o costas mixtas, como bahías con playas limitadas por puntas rocosas. Las primeras son más frecuentes en la costa del Golfo de México y Pacífico Sur, mientras que las costas mixtas ocurren con mayor frecuencia en el Pacífico Central. Finalmente, las costas menos frecuentes, las de origen erosivo como las rocosas o acantilados sedimentarios, ocurren principalmente a lo largo de la Península de Baja California, y algunas partes de Oaxaca y Yucatán. Es evidente que el tipo de costa predominante en cada zona está intrínsecamente ligado a la historia geológica de dicha margen, con las costas bajas arenosas ocurriendo en márgenes continentales pasivas, y las costas rocosas y mixtas, en márgenes continentales activas, como la zona de subducción del Pacífico. A continuación se hace una descripción de los rasgos geomorfológicos característicos de cada uno de estos tipos de costa.

*Playas (costa deposicional, baja arenosa):* En el contexto de este trabajo se entienden como playas (rectas o con salientes) a los ambientes costeros de baja elevación y contenido arenoso, formados originalmente por un proceso deposicional. Son comunes en el Golfo de México (Figura 2.24) y Mar Caribe, aunque se presentan en todo el litoral, y frecuentemente están asociadas a ecosistemas como dunas o humedales.

*Deltas (costa deposicional, baja arenosa):* Los deltas son estructuras costeras deposicionales que se forman en el punto en donde un río desemboca en un lago o mar. Sus características dependen principalmente de la magnitud de la descarga fluvial y sedimentaria, de los cambios estacionales en estos dos factores, de la configuración costera (topografía) en la zona y de los procesos hidrodinámicos (oleaje, marea y corrientes) y meteorológicos (vientos) a los que están sujetos. Algunos de los deltas más importantes de nuestro país son el delta del Río Colorado en el Golfo de California (Figura 2.25), el delta del Río Grijalva-Usumacinta en el Golfo de México y el delta del Río Bravo en Tamaulipas.



**Figura 2.24** Playa Roca Partida, Veracruz (www.flickr.com)



**Figura 2.25** Delta del Río Colorado (www.sci.sdsu.edu)

*Islas de barrera (costa deposicional, baja arenosa):* son estructuras deposicionales formadas por el transporte litoral, que se ubican emergidas y paralelas a la costa (Davis, 1985). Dado que dependen del aporte constante de sedimentos y del libre flujo de estos, pueden ser de naturaleza efímera, presentando períodos de acreción y erosión, así como bocas estacionales. Su importancia radica en ser el elemento que separa a las lagunas

costeras del mar, coadyuvando en los servicios ecológicos que éstas proveen. Además de estar intrínsecamente asociadas a las lagunas costeras, en las islas de barrera frecuentemente se pueden encontrar dunas o humedales. Un ejemplo se presenta en la Figura 2.26.



**Figura 2.26** Isla de barrera o barra, Boca del Cielo, Chiapas (GoogleEarth®)

*Playa rocosa (baja y alta) (costa erosiva, rocosa):* Son rasgos costeros que contribuyen de forma importante a la biodiversidad por la cantidad de fauna y flora bentónica que soportan. Las playas rocosas están sujetas a la acción directa de las olas y la marea, por lo que la biodiversidad que soportan debe resistir una gran gama de condiciones fisicoquímicas ocasionadas por la subida y bajada de la marea. También son importante hábitat de especies de aves, reptiles y mamíferos marinos. En la Figura 2.27 se ilustra un ejemplo en Baja California Sur.



**Figura 2.27** Playa rocosa en Cabo San Lucas, Baja California Sur (Butchofsky y Houser, [www.corbisimages.com](http://www.corbisimages.com))



**Figura 2.28** Acantilado y playa de cantos rodados en Camalú, Baja California (GoogleEarth®)

*Acantilados (costa erosiva, sedimentaria):* Un acantilado marino es un escarpe de gran pendiente, ubicado al margen del mar. En este caso se refieren a los acantilados de origen sedimentario y no rocoso (los cuales caen en la categoría anterior), y están asociados a procesos tectónicos y eustáticos. Por su naturaleza sedimentaria,

son de carácter erosivo, pudiendo presentar tasas de retroceso de varios metros al año, como sucede en la costa norte de Baja California (ver ejemplo, Figura 2.28).

### 2.2.2. Clasificación por geodinámica costera

La evolución de la costa es el resultado de la interacción y adaptación continua entre la morfología de la costa (descrita en la sección anterior) y los procesos hidrodinámicos y eólicos que actúan sobre ella (van Rijn, 1998). Esta influencia recíproca, también denominada como '*el ciclo morfodinámico*' por Beven (1996), describe las interacciones y cambios entre las formas costeras y los procesos que actúan sobre estas formas, en diferentes escalas espaciales y temporales (Brommer y Bochev-van der Burgh, 2009). Como preámbulo a la clasificación por geodinámica costera, en esta sección se describen de manera general los diferentes procesos morfodinámicos que se presentan en las costas mexicanas (propagación y transformación del oleaje, corrientes, mareas, interacciones oleaje-viento, oleaje-corrientes, oleaje-marea y transporte de sedimento, entre otros) así como el rango de escalas espaciales y temporales en las cuales ocurren.

#### Procesos morfodinámicos

Los procesos morfodinámicos son principalmente de dos tipos: hidrodinámicos y de origen eólico, y ambos interactúan con la costa a través del transporte de sedimentos.

La dinámica de sedimentos en la zona costera está dominada por las corrientes, producidas principalmente por el oleaje y las mareas (Félix Delgado, 2014), mientras que en algunas zonas el viento puede ser un factor importante, a la par de los procesos hidrodinámicos.

En el caso del oleaje, éste se propaga desde la zona de generación (aguas profundas) hacia la costa (aguas someras). Las principales modificaciones que sufre el oleaje durante el arribo a la costa son:

- Asomeramiento
- Refracción
- Difracción
- Reflexión
- Rompiente del oleaje
- Disipación

La refracción, el asomeramiento y la difracción son resultado de la convergencia o divergencia del oleaje debido a los contornos batimétricos, esto influye en la dirección del oleaje y son la causa principal de la creación de las corrientes, así como de la concentración o disgregación de la energía del oleaje antes del rompimiento. La disipación del oleaje es el mecanismo reductor de la energía del oleaje y los principales fenómenos que la producen son la rompiente del oleaje, la percolación y la fricción.

En el caso de existir estructuras artificiales, la difracción y la reflexión son mecanismos a tomar en cuenta. La primera por sufrir un cambio importante en la interrupción de la propagación del oleaje, y en el caso de la reflexión por producirse cuando un frente de oleaje se encuentra con un obstáculo que refleja total o parcialmente la energía de este.

Existen también procesos que no son generados únicamente por la presencia del oleaje de forma individual. Las interacciones más comunes de dos agentes en la zona costera son:

- Oleaje-viento

- Oleaje-corriente
- Oleaje-oleaje
- Oleaje-marea

La interacción del oleaje con el viento da como resultado un incremento adicional en la altura de ola. En los casos de interacción oleaje-oleaje u oleaje-marea, sus componentes no lineales ocasionan una transferencia de energía entre ellas, en algunos casos esta transferencia podrá generar un aumento o disminución, tanto de energía como de tamaño de la onda resultante. En la interacción oleaje-corriente, la corriente puede afectar la propagación y disipación del oleaje.

Las corrientes generadas por el oleaje incidente oblicuo a la costa, dominan generalmente la zona de surf; las corrientes producidas por las mareas controlan los estuarios y las bocas costeras. Las corrientes impulsadas por el viento tienen un papel fundamental en la costa cuando son generadas por tormentas. Dependiendo de la forma y rigidez de la costa estas corrientes podrán ser paralelas o perpendiculares con respecto a ella.

En el caso de zonas que alcancen grandes profundidades cercanas a la costa, es importante tomar en cuenta procesos de corrientes inducidas por densidad, así como surgencias debidas a estos mismos cambios o a fuertes procesos del viento sobre la costa.

*Transporte de Sedimentos:* Un proceso esencial en la morfodinámica de la costa es el transporte de sedimentos. El sedimento puede ser transportado por el viento, el oleaje, las corrientes, y las interacciones existentes de estos agentes. El movimiento de los sedimentos en la zona costera es el factor más importante para la estabilidad de ésta (Félix Delgado, 2014).

El transporte de sedimentos resultado de las corrientes inducidas por el oleaje que rompe, se conoce también como transporte litoral. Este tipo de transporte se da generalmente paralelo a la costa, en la zona de surf (ver Figura 2.1), y es el proceso principal que determina el perfil de playa. El transporte de sedimentos puede darse también fuera de la zona de surf, ya sea hacia la costa o hacia el mar, esto le permite generar las bermas en tierra y las barras sumergidas en el mar. En condiciones extremas de oleaje, tanto las bermas como las barras son importantes para el transporte de sedimento y desarrollo de los sistemas de dunas ya que vuelven a poner sedimento en circulación dentro de la zona de surf.

Existen cuatro modos de transporte: el arrastre, la suspensión, la saltación y el rodamiento. Estos dependerán de la energía que presente el oleaje, así como del tamaño de sedimento. Los factores que controlan el tamaño de las partículas en movimiento son la fuente del sedimento y la energía del oleaje.

Ya que las condiciones del oleaje varían a lo largo del tiempo, el transporte de sedimentos lo hace también como respuesta al cambio de éste. Lo anterior permite tener diferentes direcciones y magnitudes del transporte litoral a lo largo del tiempo, bajo determinadas condiciones el transporte puede permitir grandes depósitos de sedimento por épocas de calma (acreción) o la pérdida del sedimento por condiciones extremas (erosión).

Por su parte, el viento desplaza las partículas sueltas, básicamente, según los mismos mecanismos que los flujos hídricos, en función del tamaño del grano y de la velocidad del fluido. Los granos de arena viajan a favor del viento, permaneciendo cerca de la superficie, separándose gradualmente de las partículas más gruesas que pesan demasiado para que el viento las desplace lejos. De este modo se origina una masa característica de sedimentos conocida como *arena eólica* o arena de duna, cuyas partículas tienen



un diámetro entre 0.1 y 1 mm, compuesta en su mayor parte por cuarzo, por ser el mineral cuya dureza y resistencia química lo convierten en el más duradero de los materiales que contienen las rocas. Los granos de cuarzo transportados por el viento ofrecen formas redondeadas y sus superficies están cubiertas de microscópicas fracturas por el impacto de unos granos contra otros. Los mecanismos de transporte eólico del sedimento son similares al transporte por flujos hídricos: las partículas más gruesas son transportadas por rodamiento y arrastre sobre la superficie; los granos menos gruesos son capaces de viajar por saltación elevándose hasta alturas de 2 ó 3 metros en algunos casos; finalmente, las partículas finas (limos y arcillas) pueden desplazarse en suspensión y ser elevadas a grandes alturas por las corrientes ascendentes, tan frecuentes en las regiones cálidas.

*Equilibrio:* La cantidad de aporte y pérdida de sedimento en la costa es el principal factor que afecta su estabilidad. Una playa se considera estable o en equilibrio cuando la pendiente y la forma de esta, así como su distribución de tamaños de sedimento no varían en el tiempo (Silvester y Hsu, 1997). Komar (1997), menciona que el equilibrio de una playa depende del balance que existe entre la acreción y la erosión que se dé en ella. Pueden encontrarse diferentes tipos de equilibrio: estático, metaestable, permanente o dinámico. Este último es el más común e involucra ciclos morfológicos a través del tiempo que pueden ser mayores a una decena de años.

En síntesis, el comportamiento de la costa depende básicamente de sus características morfológicas, del sedimento, del oleaje y de las corrientes. Una forma de estudiar la morfodinámica de una zona costera es mediante celdas, donde los procesos hidrodinámicos modifican la morfología y viceversa (Félix Delgado, 2014). Este enfoque se explicará en mayor detalle, en el Capítulo 4, donde se analizan dos casos de estudio a nivel Unidad de Manejo.

#### Escalas temporales y espaciales

En épocas pasadas, el estudio de los fenómenos naturales estaba limitado a los alcances de la percepción humana (Church, 1996). Sin embargo, existen una infinidad de procesos y cambios que están fuera del rango de las observaciones humanas ordinarias; por un lado se tiene el movimiento de los granos de sedimento por la turbulencia de los fluidos y al otro lado de la escala, las transgresiones glaciales, por ejemplo. Esto deriva en un problema fundamental para los estudios de la zona costera: la integración de las diferentes escalas temporales y espaciales, particularmente, desde la perspectiva del manejo costero a gran escala (de Vriend, 2003).

Históricamente, las diferentes disciplinas involucradas en los estudios costeros han abordado este problema estudiando la evolución costera en escalas específicas predefinidas, lo cual ha resultado en una gran variedad de metodologías de investigación, que, frecuentemente, sólo pueden ser aplicadas en estos rangos de escalas tan limitados (Brommer y Bochev-van der Burgh, 2009). Los ingenieros costeros por ejemplo, tradicionalmente se han enfocado en la medición y simulación de procesos litorales a escalas temporales y espaciales pequeñas, mientras que generalmente las escalas manejadas por las comunidades estratigráficas o morfológicas son mucho mayores (ibid.). Sin embargo, cada día más, la evidencia indica que los cambios naturales y antropogénicos en la zona costera están dominados por procesos de gran escala, que sólo se manifiestan a través de escalas temporales relativamente largas (décadas) (Hanson *et al.*, 2003). Asimismo, la tendencia actual es que las escalas temporales y espaciales de los procesos morfodinámicos están ligadas entre sí, de tal forma, que cada proceso o cambio puede estar descrito en término de sus escalas

características (Brommer y Bochev-van der Burgh, 2009). Este enfoque, que relaciona directamente las escalas de los procesos y las escalas de las características morfológicas se llama la *relación primaria de las escalas* (de Vriend, 1991). La *relación primaria de las escalas* asume que un proceso que ocurre a una escala de cierto nivel está en interacción dinámica con el comportamiento morfológico a la misma escala. Por lo tanto, se asume que un proceso que ocurre a una escala menor que la escala de interés puede ser considerado como ruido, mientras que los procesos de mayor escala pueden ser utilizados como condiciones de frontera para la escala en consideración (de Vriend *et al.*, 1993).

El enfoque aplicado en el presente estudio es el de Brommer & Bochev-van der Burgh (2009), basado en Cowell *et al.* (2003). Su modelo conceptual considera no sólo los elementos morfológicos de la célula litoral (dunas, playa, barrera, etc.), sino también los procesos físicos involucrados (olas, corrientes, transporte de sedimentos, presupuesto sedimentario, etc.), y los organiza en jerarquías que permiten hacer un análisis por niveles (ver Figura 2.29). Cada nivel se considera como un sistema que comparte sedimento internamente, en donde las escalas temporales y espaciales son características de cada nivel. A lo largo de este estudio se considerarán escalas en nivel meso, macro y mega. Las primeras fases del proyecto lidian con mega y macro escalas, mientras que la fase final, en la cual se hacen recomendaciones a nivel de unidades de manejo o celdas litorales, estará en el rango de las meso escalas.

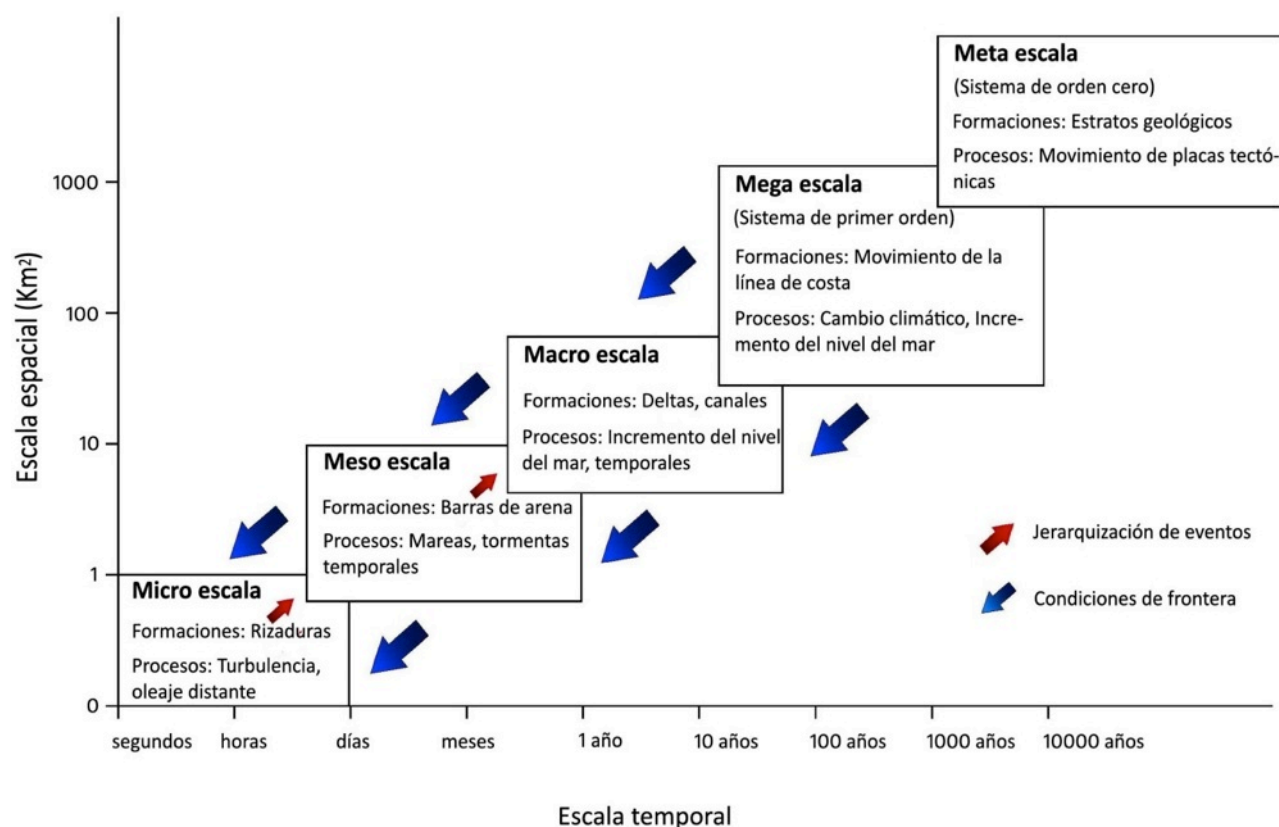


Figura 2.29 Escalas de evolución de la costa (modificado de Brommer & Bochev-van der Burgh, 2009)

El modelo de Cowell *et al.* (2003) no considera los procesos ecológicos, los cuales, al igual que los procesos físicos influyen las formaciones costeras y abarcan una variedad de escalas espaciales y temporales, desde procesos químico/biológicos a nivel individuo, como la respiración (micro escala), hasta la creación o desaparición de poblaciones enteras (meso y macro escala). Sin embargo, para fines de restauración o protección, es útil contar con información sobre las escalas de regeneración o formación de los principales ecosistemas. De acuerdo con Bailey (2009), los ecosistemas se pueden estudiar en tres escalas espaciales: sitio, paisaje y eco-región. La escala más pequeña se refiere a sitios donde el ecosistema es completamente homogéneo (algunas hectáreas); el paisaje está compuesto por una serie de sitios unidos y relacionados entre sí, formando una especie de 'paisaje de parches' (10 km<sup>2</sup> a varios miles de km<sup>2</sup>); y, finalmente, una eco-región está formada por una serie de paisajes que intercambian energía y flujos entre sí. Estos intercambios y relaciones crean verdaderas unidades económicas y ecológicas. Para detalles sobre la correlación entre estas escalas espaciales y sus respectivos rangos de escalas temporales para ecosistemas específicos, ver la sección 2.1.2 de Caracterización ecológica.

En el caso de la clasificación por geodinámica costera, se utilizó la siguiente tipificación (Ortiz Pérez y Méndez Linares, 2004): a) comportamiento regresivo, b) comportamiento transgresivo, y c) comportamiento estable (ver Figura 2.30). Este comportamiento se identificó a partir del análisis de la posición histórica de la costa y aunque está relacionado al proceso de formación de la costa descrito en la clasificación previa (erosiva o deposicional), este proceso no necesariamente continúa en la actualidad, principalmente en aquellos casos en que las condiciones del sistema han sido modificadas ya sea natural o artificialmente. Por ejemplo, una isla de barrera, formada por el transporte de material a lo largo de la costa, puede comenzar a sufrir erosión si la fuente de ese material es alterada por causas naturales o antropogénicas, como una presa. De tal forma que ese rasgo geomorfológico (isla de barrera), característico de las costas de origen deposicional, de acuerdo a la clasificación anterior, puede presentar un comportamiento regresivo en el presente. En general, el comportamiento identificado está limitado a las costas bajas arenosas y mixtas, que son aquellas más vulnerables.

### 2.2.3. Clasificación hidrodinámica

Además de sus características geomorfológicas, las costas también pueden ser clasificadas de acuerdo al proceso hidrodinámico dominante; oleaje, marea o ambos (ver Figura 2.31). Para esto se utilizó la clasificación de Davis y Hayes (1984) y los datos de oleaje y marea presentados en la sección de caracterización hidrodinámica (Sección 2.1.3). La clasificación de Davis y Hayes (1984) asume que existe una relación entre la evolución de la morfología costera y el proceso dominante en un estrecho de costa particular.

La mayoría de los autores consideran a las costas de barrera, largas y rectas, con pocas bocanas, y deltas poco desarrollados, como costas dominadas por la acción del oleaje y asociadas a rangos micromareales. Por otra parte, las costas mesomareales tienden a desarrollar barreras cortas y con deltas bien definidos. Este tipo de costa está considerado como barreras dominadas por la acción de la marea. Sin embargo, de acuerdo a Davis y Hayes (1984) estas generalizaciones están restringidas a las costas con energía del oleaje moderada, de tal forma que existen una infinidad de excepciones y combinaciones de estas dos variables, por lo que una adecuada caracterización requiere de la consideración tanto de datos de oleaje, como de marea.

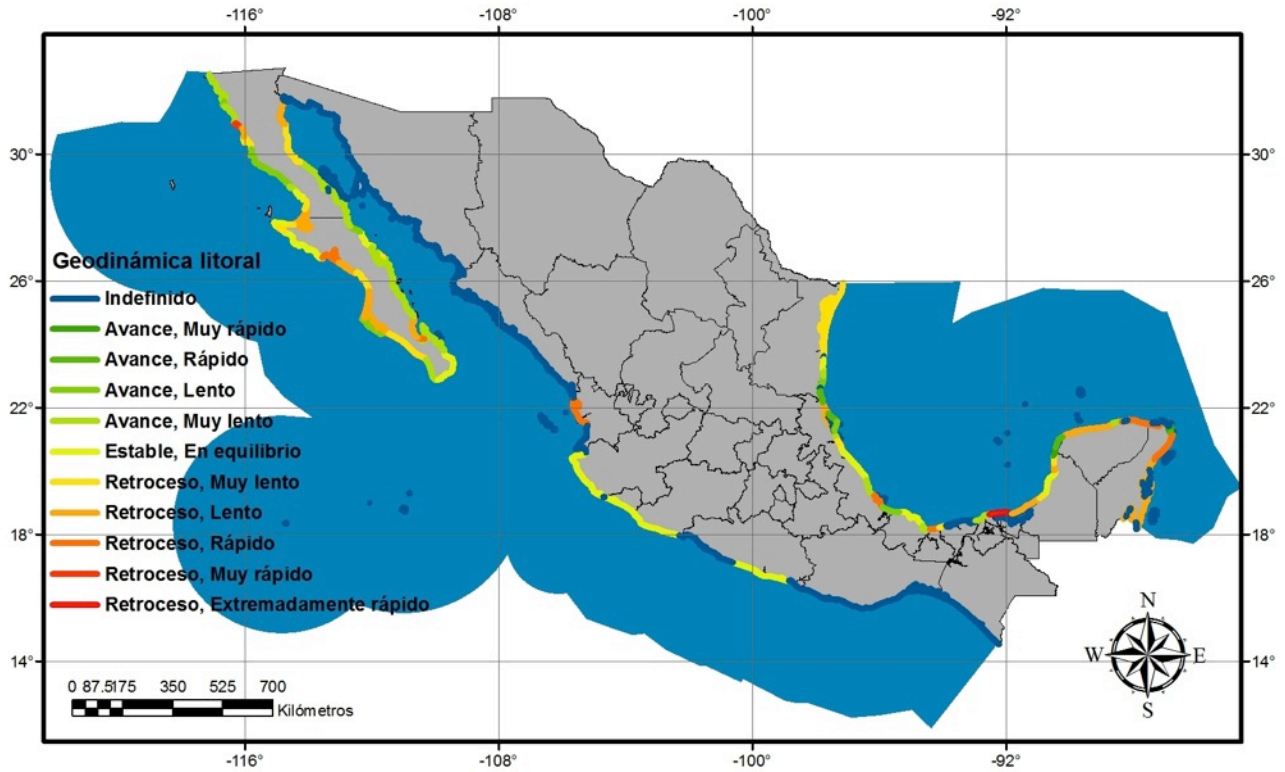


Figura 2.30 Geodinámica costera (elaboración propia con datos del Instituto de Geografía de la UNAM)

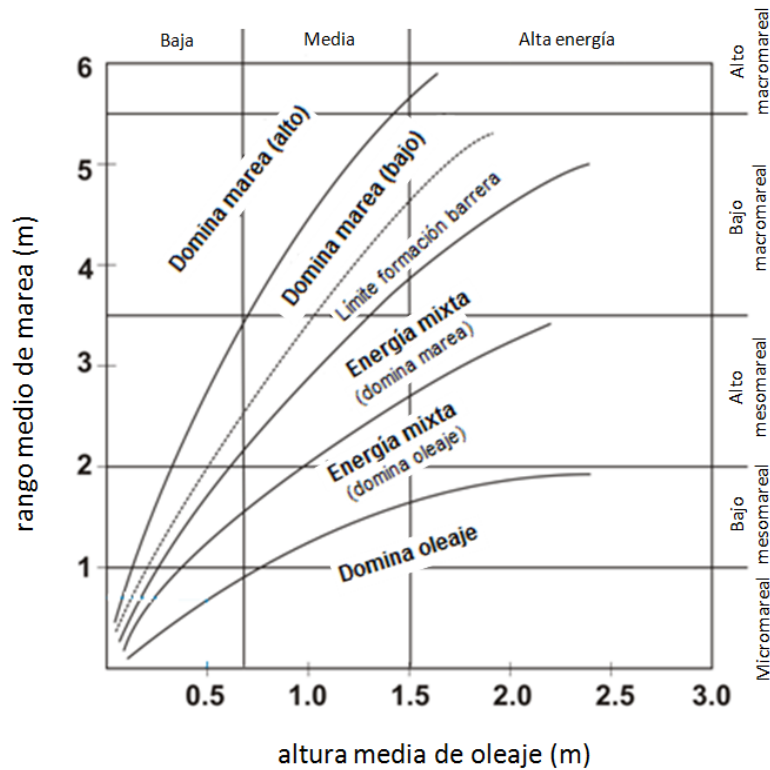


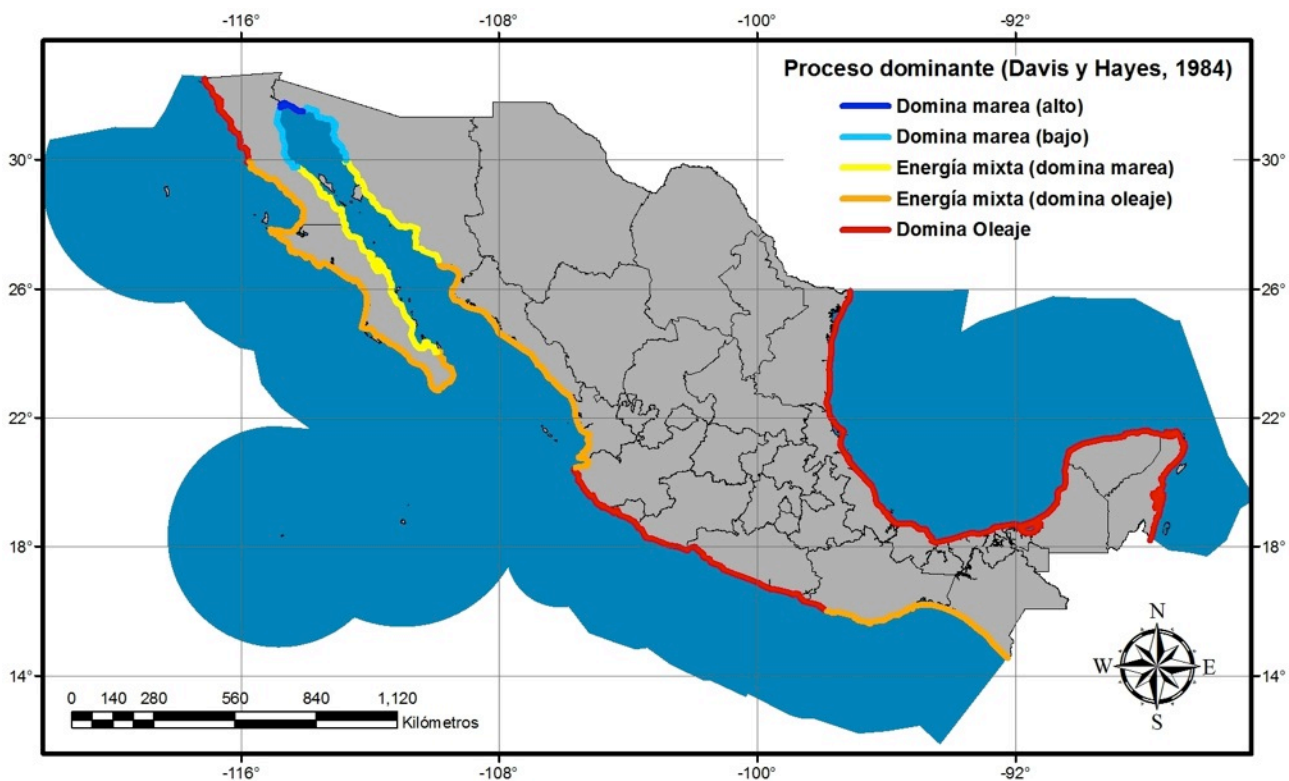
Figura 2.31 Clasificación de las costas de acuerdo al proceso dominante (modificado de Davis y Hayes, 1984)

Este tipo de caracterización, basada en la energía, también es importante al estudiar la viabilidad de desarrollos en la zona costera, ya que el proceso dominante puede ser utilizado como indicador de la tendencia evolutiva de un estrecho de costa en particular, permitiendo valorar no sólo la viabilidad de un proyecto, sino proponer escenarios específicos de respuesta de la costa ante su construcción.

La clasificación hidrodinámica consistió en encontrar el proceso dominante para 20 puntos a lo largo de la costa (Davis y Hayes, 1984), de tal forma que ésta se dividió en:

- a) domina marea (alto),
- b) domina marea (bajo),
- c) energía mixta (domina marea),
- d) energía mixta (domina oleaje), y
- e) domina oleaje.

En México existen muy pocas regiones con rangos de marea grandes, por lo que en la mayor parte del litoral, incluyendo todo el litoral del Golfo y la mayor parte del Pacífico, el proceso dominante es el oleaje (ver Figura 2.32). Solamente ciertas partes del interior del Golfo de California presentan dominancia de la marea. Más adelante, en la sección de identificación de ambientes (sección 2.5), se discuten las implicaciones de dichos procesos en las características geomorfológicas de la costa.



**Figura 2.32** Clasificación de la costa de acuerdo al proceso hidrodinámico dominante (elaboración propia con datos de la Red Mareográfica Nacional)

## 2.3. Identificación de zonas de riesgo

El riesgo se define como la probabilidad de que un evento catastrófico (peligro) cause daños en una región (vulnerabilidad), de tal forma que para la adecuada estimación del riesgo por inundación y erosión en la zona de costa, es necesario contar con: información sobre la frecuencia y magnitud de los diferentes peligros hidrometeorológicos (sección 2.3.1); e información sobre las características de dicha región, que permita estimar su vulnerabilidad (sección 2.3.2).

En este caso, la evaluación del riesgo se realizó mediante la aplicación del modelo Fuente- Trayectoria – Receptor - Consecuencia (SPRC, por sus siglas en inglés). Se trata de un modelo conceptual simple para la representación de los sistemas y procesos que conducen a una consecuencia particular. En concreto, en inundaciones costeras este modelo permite una mejor representación instantánea de los procesos físicos de inundación que tienen lugar de acuerdo a la propagación y consecuencias de un evento particular de la inundación (Narayan *et al.*, 2011). Los elementos que lo componen son:

- Fuente (*Source*): se refiere a los factores climáticos o peligros que provocan la iniciación del evento, como son fuertes lluvias, oleaje extremo o marea de tormenta.
- Trayectoria (*Pathways*): describe los peligros que se pueden encontrar en el camino que recorre el riesgo desde la *fuentes* iniciadora del mismo hasta alcanzar al *receptor*. Incluye tanto los elementos naturales como los de origen humano, como son los procesos morfológicos de inundación, modos de fallo, comportamiento de los sistemas de defensa y sus componentes, y procesos de iniciación y crecimiento de fisuras o brechamiento (*breaching*).
- Receptor (*Receptor*): son todas las entidades físicas que reciben el riesgo, como es la población situada en áreas propensas a inundación, propiedades, infraestructuras o ecosistemas sensibles. También incluye impactos ecológicos y recepción del riesgo.
- Consecuencia (*Consequence*): especifican los efectos adversos físicos, sociales, institucionales, económicos o medioambientales ocasionados por la ocurrencia de un peligro. Se evalúan los daños socio-económicos y medioambientales, pérdidas tangibles e intangibles (directas/indirectas) incluyendo resiliencia social y ecológica, y la aceptación y percepción del riesgo.

En la Figura 2.33 se muestra un modelo conceptual que resume los cuatro componentes mencionados, para el caso de las costas mexicanas. El grado de exposición del *receptor* al peligro y las *consecuencias* describen la vulnerabilidad o propensión de un sistema a ser afectado por la ocurrencia de un peligro o evento determinado.

### 2.3.1. Peligros

Los principales peligros costeros identificados en México, relacionados al riesgo de inundación y erosión, son el oleaje, marea de tormenta, viento, corrientes y precipitación pluvial. De estos, tanto por su frecuencia de ocurrencia como su magnitud, los primeros tres son aquellos de mayor impacto. Además de clasificar la costa de acuerdo a su nivel energético o rango mareal, como se hizo en la sección anterior (sección 2.2), es conveniente evaluar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos para diferentes partes del litoral, ya que son estos los que con frecuencia causan el mayor daño y no las condiciones reinantes.

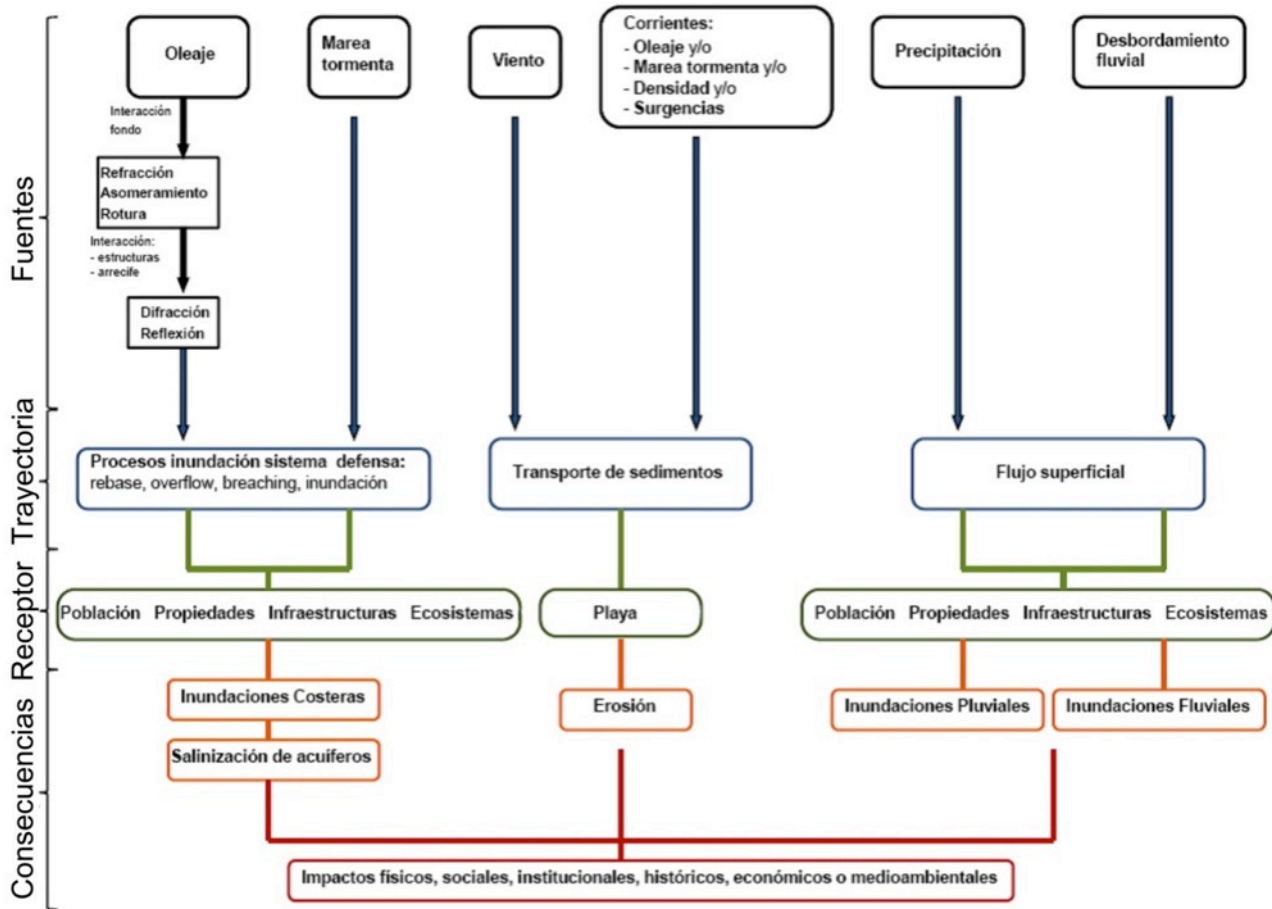
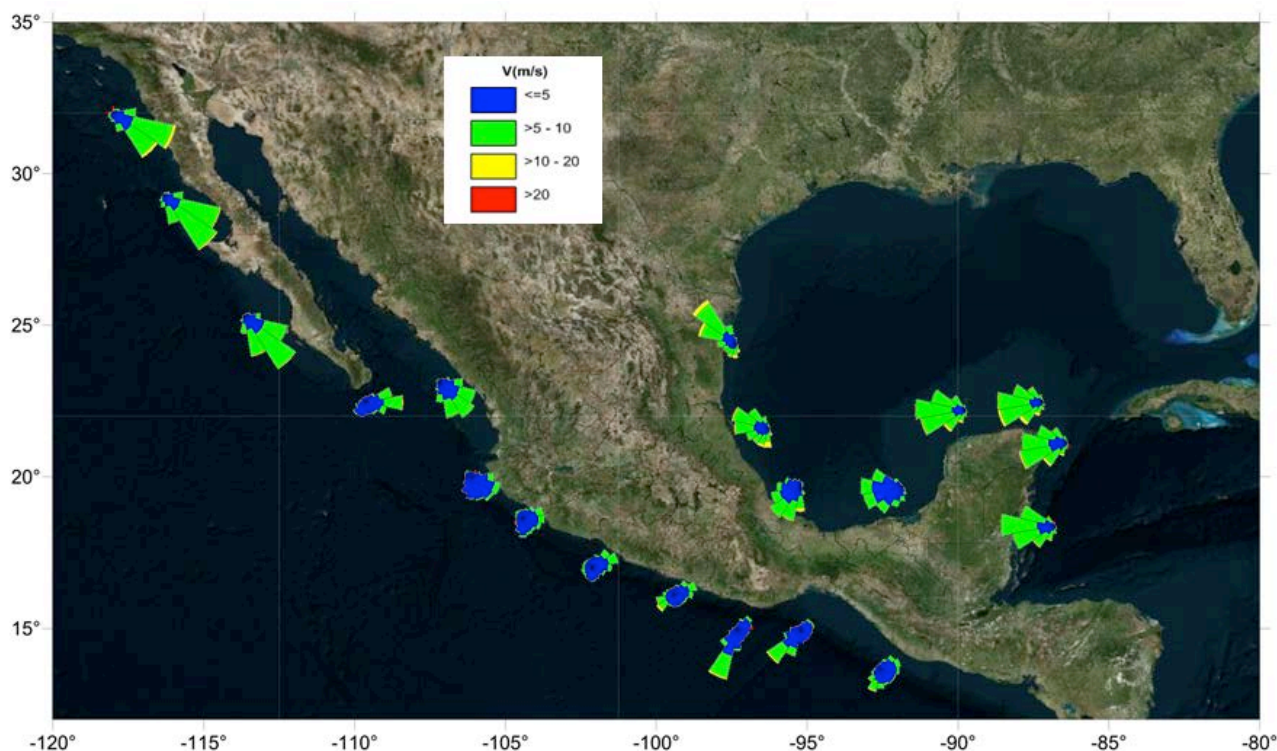


Figura 2.33 Modelo conceptual SPRC de riesgos para la costa mexicana

La identificación de los peligros hidrometeorológicos se realizó a partir de una revisión bibliográfica de estudios y modelaciones existentes (Arriaga *et al.*, 2010; Durán Valdez *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2008). Los datos de oleaje pertenecen al Atlas de Clima Marítimo de las vertientes Atlántica y Pacífica mexicana, el cual utiliza un modelo híbrido de oleaje y viento WAM-HURAC, para modelar el oleaje durante el período de 1948 a 2007 (Silva *et al.*, 2008), mientras que los datos correspondientes a marea de tormenta corresponden a los trabajos de Arriaga *et al.* (2010) y Durán *et al.* (2010) y fueron obtenidos con el modelo híbrido MaTO-HURAC.

Debido a la gran cantidad de análisis y gráficos, los resultados pueden ser consultados directamente en las fuentes citadas. En la Figura 2.34 a manera de ejemplo, se presenta las rosas de viento para los puntos analizados.

Para el caso del oleaje, se encontró que el peligro por oleaje en las costas mexicanas puede ser de dos tipos, por oleaje lejano, es decir olas de gran amplitud y período generadas por tormentas que ocurren a miles de kilómetros de nuestras costas; y oleaje de tormenta, que generalmente ocurre como resultado de tormentas tropicales y huracanes y viene acompañado de fuerte vientos y de una sobre elevación del mar por efecto de los vientos y las bajas presiones.



**Figura 2.34 Rosa del oleaje, calculado para el período 1948-2009 (elaboración propia con datos de Silva et al., 2008)**

El oleaje lejano, aunque de menor magnitud y capacidad de daño por no estar acompañado de sobre elevación del mar por tormenta, debe ser considerado en este análisis ya que presenta una mayor frecuencia de ocurrencia. Este tipo de oleaje se presenta principalmente en la costa centro y sur del Pacífico, durante los meses de verano (invierno en el hemisferio sur, donde se origina este oleaje). Las olas que se presentan anualmente pueden ser del orden de los 5 m, representando un peligro tanto para la infraestructura como para la gente. Las zonas para las cuales se ha estimado el mayor peligro son los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, así como Baja California.

Por otra parte, una gran porción de la costa de México es una zona vulnerable a los huracanes que se forman sobre las aguas cálidas del Pacífico y del Golfo y mar Caribe. Se clasifican como huracanes los ciclones tropicales con vientos superiores a 118km/h. Durante los huracanes se presenta no sólo oleaje extremo sino marea de tormenta, la cual incrementa la capacidad de daño del oleaje pues éste rompe directamente sobre las playas y/o estructuras costeras, debido a la sobre elevación del mar. El oleaje extremo estimado para una serie de puntos frente a la costa, en aguas profundas y para tormentas con un período de retorno de 100 años, indica que éste es mayor en el Caribe que en el Pacífico. Esto se debe a la ocurrencia de huracanes, que es mayor en la Península de Yucatán que en el Pacífico.

Los resultados para marea de tormenta indican que, la variabilidad en los valores de marea de tormenta es más importante cuando la configuración de la costa es irregular, como en el caso de lagunas costeras. Asimismo, en general, dadas las características de los huracanes y de la plataforma continental, la sobre elevación para un período de retorno de 100 años tiende a ser mayor en el Caribe que en el Pacífico. También es apreciable, que en ambos casos las sobre elevaciones probables van disminuyendo conforme se avanza al



norte, debido, en gran medida, a la fuerza que van perdiendo los huracanes mientras se alejan de las aguas cálidas del Caribe y del Pacífico, respectivamente.

### 2.3.2. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad costera puede ser física, que es determinada por una combinación de las características geomorfológicas, hidrodinámicas y ambientales, y socio-económica, en cuyo caso influyen factores como el nivel de marginación, tipo de construcciones, densidad poblacional, etc.

La mayoría de los estudios en México se han centrado en analizar la vulnerabilidad a gran escala (nacional), dado que es para esta escala para la cual existe mayor disponibilidad de datos socioeconómicos, geológicos y ecológicos, a partir de los cuales se identifiquen indicadores específicos (Ortiz Pérez y Méndez Linares, 2004; Seingier *et al.*, 2010); sin embargo, existen pocos estudios a nivel local. En el último capítulo se presentan dos casos de estudio donde se analiza la relación entre las características de un sitio en particular y su vulnerabilidad físico-ambiental, mientras que en esta sección solamente se presenta un modelo conceptual en el cual se incluyen ejemplos de niveles (mayores o menores) de vulnerabilidad, correspondientes a características específicas de la costa (ver Figura 2.35). Siguiendo este modelo, se encontraron las zonas más vulnerables a la inundación costera a escala nacional, como se muestra en la Figura 2.36. Estas áreas son, en su mayoría, planicies costeras o llanuras de inundación, que por su baja elevación con respecto al nivel medio del mar, son más susceptibles a inundaciones por marea de tormenta y oleaje extremo. De la misma forma, a una escala nacional o regional, los mapas de tipo de costa y geodinámica costera presentados en la sección previa se pueden utilizar como indicadores confiables de aquellas zonas más vulnerables a la erosión, donde las costas bajas arenosas y que presentan retroceso son las más vulnerables.

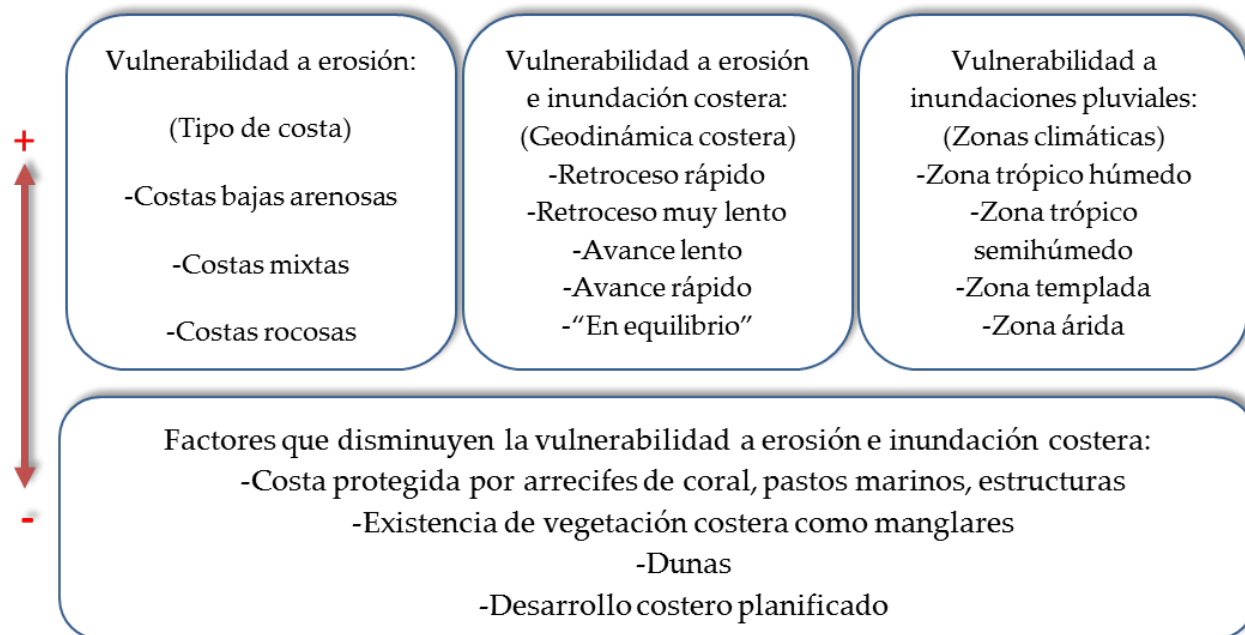
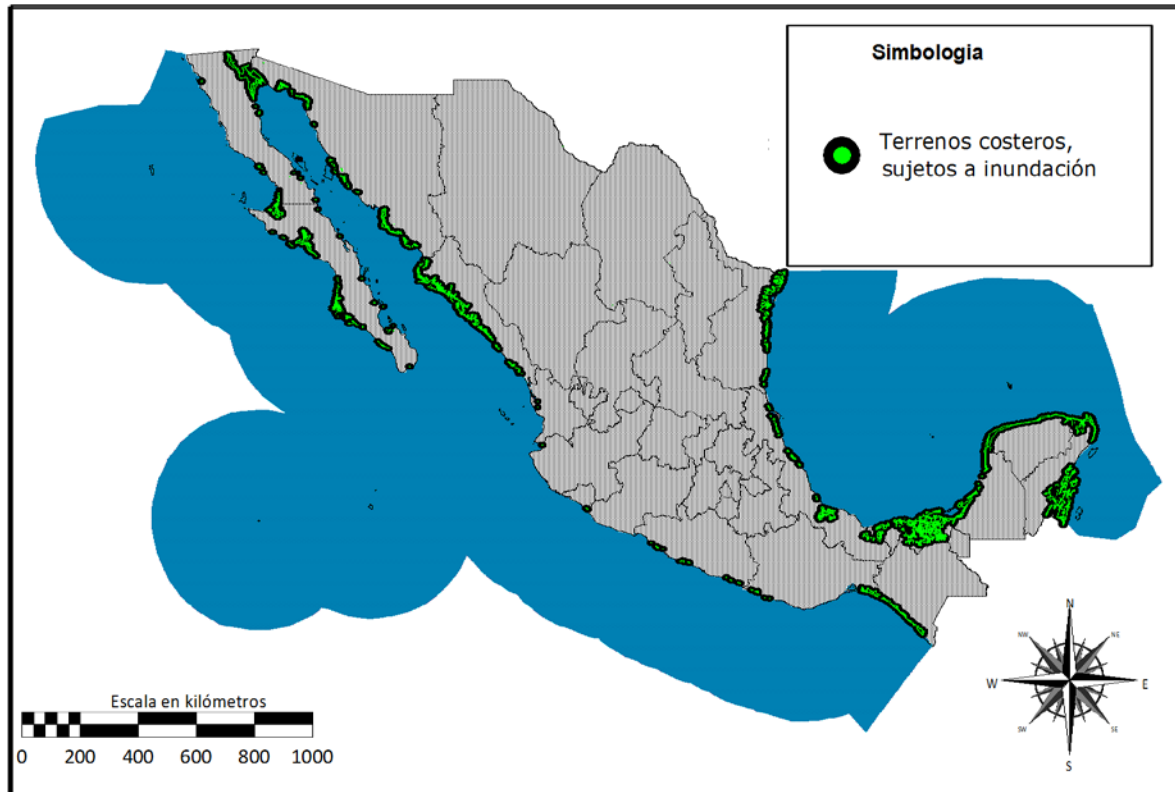


Figura 2.35 Vulnerabilidad y factores que contribuyen a la mitigación de riesgos



**Figura 2.36 Planicies costeras vulnerables a la inundación por su baja elevación**

Además de las características físicas indicativas de vulnerabilidad, existen una serie de factores que contribuyen a disminuir la vulnerabilidad de la costa ante la inundación y la erosión (ver Figura 2.33). Por una parte están los factores naturales, como las dunas o arrecifes de coral, que actúan como estructuras de barrera naturales ante dichos riesgos. Por otra parte, existen los factores antropogénicos, tales como el desarrollo costero planificado (entendido como desarrollo sustentable, en el que se respeta el uso de suelo decretado en los ordenamientos ecológicos del territorio y se tiene en cuenta los intereses económicos y culturales de la población a nivel local y nacional), que contribuye de una forma menos tangible a disminuir la vulnerabilidad. Cuando estos factores no son procurados, frecuentemente es necesario aplicar estrategias de mitigación para evitar las graves consecuencias económicas y sociales de la erosión e inundación.

### **2.3.3. Propuesta de estrategias de mitigación ante impactos**

Tomando como base las estrategias de mitigación de impactos ante situaciones de erosión o inundación planteadas en los Planes de Manejo de la Línea de Costa del Reino Unido, descritos en la sección 1.2.2, y los factores que contribuyen a disminuir la vulnerabilidad según la Figura 2.35, a continuación se proponen una serie de estrategias de actuación, todas ellas compatibles entre sí y aplicables simultáneamente en caso necesario.

- Estrategia de acomodación o retirada. Consiste en la modificación y mejora de los bienes amenazados por la regresión de la línea de costa para hacerlos compatibles con ésta, o bien, en su levantamiento o reubicación tierra adentro, dando un margen de seguridad adecuado. Esta solución, aunque sencilla y lógica, suele ser socialmente traumática.

- Estrategia de prevención y corrección. Se trata de tomar medidas para eliminar o corregir las causas que generan la erosión con el fin de frenarla, siempre y cuando éstas se conozcan exactamente y exista forma de eliminarlas.
- Estrategia de protección y defensa. Consiste en detener la regresión de la línea de costa mediante la construcción de obras de defensa, como diques arrecife o diques no rebasables.
- Estrategia de regeneración. Consiste en recuperar las condiciones en que se encontraba la playa antes de erosionarse o incluso, “mejorarlas”.
- Estrategia nula. La opción de no abordar ninguna acción y dejar que la naturaleza obre en un escenario sin tomar medidas, donde se permita su funcionamiento independiente de cualquier actuación de acomodación, prevención, protección o recuperación es cuestionable, ya que si esto sucediese, muchos lugares importantes del litoral se verían dramáticamente afectados en un corto período de tiempo, pudiendo incluso llegar a desaparecer las playas en algunos tramos de costa.

La mejor protección contra la erosión, inundación y los daños estructurales producidos por los cambios de las playas desde y hacia el mar consiste en la preservación de una franja amplia de playa que esté protegida por una duna frontal que reciba las olas de tormenta. En este caso hay suficiente arena disponible para alimentar la barra que se forma aguas adentro durante las tormentas y su adaptación dinámica con los procesos de cambio y variabilidad climática se da como un proceso de largo plazo.

En México, como se ha hecho en otros países, se deben crear áreas de preservación, permitiendo la conservación de las dunas y manglares para evitar muchos de los problemas de erosión que se tienen hoy en día. Más aún, teniendo en cuenta la variabilidad y cambio climático, así como los procesos de tipo geológico se debe crear una estrategia nacional de preservación de la franja costera, específicamente de la línea de costa con playas (arenosas o rocosas) con la finalidad de proteger a los ecosistemas presentes y asegurar por un lado, el mantenimiento en los sistemas duna-playa (donde existan y que en particular, es donde se prefiere emplazar desarrollos turísticos) y por otro lado, de algún modo asegurar las inversiones públicas o privadas en la zona costera. Desgraciadamente, esto conllevará el costo de tener que demoler y prohibir desarrollos costeros mal planeados.

Las recomendaciones que se hacen en esta sección son generales y pretenden ser un preámbulo a al análisis presentado en el Capítulo 3, donde se proponen lineamientos y regulaciones para diferentes actividades y obras por tipo de ambiente.

## 2.4. Regionalización de la costa

Utilizando como base la caracterización y clasificación costera, así como la identificación de zonas de riesgo, se procedió a proponer una nueva regionalización de la costa, la cual consta de dos etapas, la zonificación y la delimitación de ésta.

- a. La zonificación se hace en tres escalas, nacional, regional y local. La zonificación nacional se realiza con base en los datos geomorfológicos e hidrodinámicos, mientras que para la zonificación a nivel regional y local (discutida solamente a nivel de metodología en el Capítulo 4), se incluye también información ecológica.

- b. En el caso de la delimitación de la zona costera, es decir, el establecimiento de sus límites marinos y terrestres, se debe de considerar el efecto acumulativo de todos los factores mencionados anteriormente, los cuales, en algunos casos como el alcance de la influencia de la marea, sólo están disponibles para la escala local, de tal forma que la extensión de la franja denominada como zona costera será variable para cada Unidad de Manejo estudiada, dependiendo de sus características.

#### 2.4.1. Zonificación

Existen una gran diversidad de zonificaciones o regionalizaciones de la zona costera mexicana, basadas en diferentes metodologías y conceptos dependiendo de sus objetivos. Algunos de los parámetros más utilizados son físicos y biológicos, aunque también se han utilizado consideraciones socioeconómicas en gran medida. Aquí se hace un recuento de las regionalizaciones más representativas en el ámbito de la gestión costera, basándose en la amplia revisión de los antecedentes de la regionalización de la costa, realizada por Espejel y Bermúdez (2009), por lo que se recomienda referirse a tal publicación para obtener un recuento más completo.

Muchas de las regionalizaciones de la zona costera habían estado basadas meramente en las características físicas y ecológicas del medio marino, tales como la identificación de las eco-regiones marinas de México en niveles I, II y III, presentadas en el *Capital Natural de México* (Sarukhán *et al.*, 2009), dejando a un lado las características de la interfaz terrestre. Dentro de este grupo también se encuentra el trabajo de Merino (1987), que distingue siete zonas costeras, poniendo el borde de la plataforma como límite oceánico de la zona costera y los 200 m sobre el nivel medio del mar como límite continental.

Un aporte importante fue introducido por Hayden *et al.* (1984), quienes utilizaron estructuras geofísicas como aproximación básica para la regionalización, señalando la importancia de considerar tanto los factores oceánicos como los terrestres en la regionalización del espacio costero, recomendación también hecha por Sorensen y Brandani (1987).

Una regionalización que sigue tal integración es la de los *Grandes Ecosistemas Marinos* (GEM) ([www.edc.uri.edu](http://www.edc.uri.edu)), que identifica regiones del ambiente costero, que abarcan desde las cuencas hidrológicas y estuarios hasta el borde de las plataformas continentales, incluyendo sus características batimétricas, hidrográficas, y de procesos ecológicos.

En la *Política Ambiental Nacional para el Desarrollo Sustentable de Océanos y Costas de México* (SEMARNAT, 2006) se retoma la zonificación costera de Rivera Arriaga y Villalobos Zapata (2001), la cual divide la zona costera de México en 5 vertientes que constituyen regiones oceánicas con características propias: Región Pacífico Norte, Región Mar de Cortés, Región Pacífico Sur, Región Golfo de México y Región Caribe Mexicano (ver Figura 2.37). Esta regionalización, aunque práctica, está basada principalmente en actividades económicas y solamente considera las características físicas de las cuencas oceánicas en un segundo plano. Adicionalmente, no incluye ninguna característica de la parte 'terrestre' de la zona costera.

Finalmente, una de las regionalizaciones más recientes y también una de las más completas es la propuesta por Ortiz Pérez y de la Lanza Espino (2006), realizada en función a características fisiográficas de homogeneidad relativa, un enfoque similar al de este estudio.

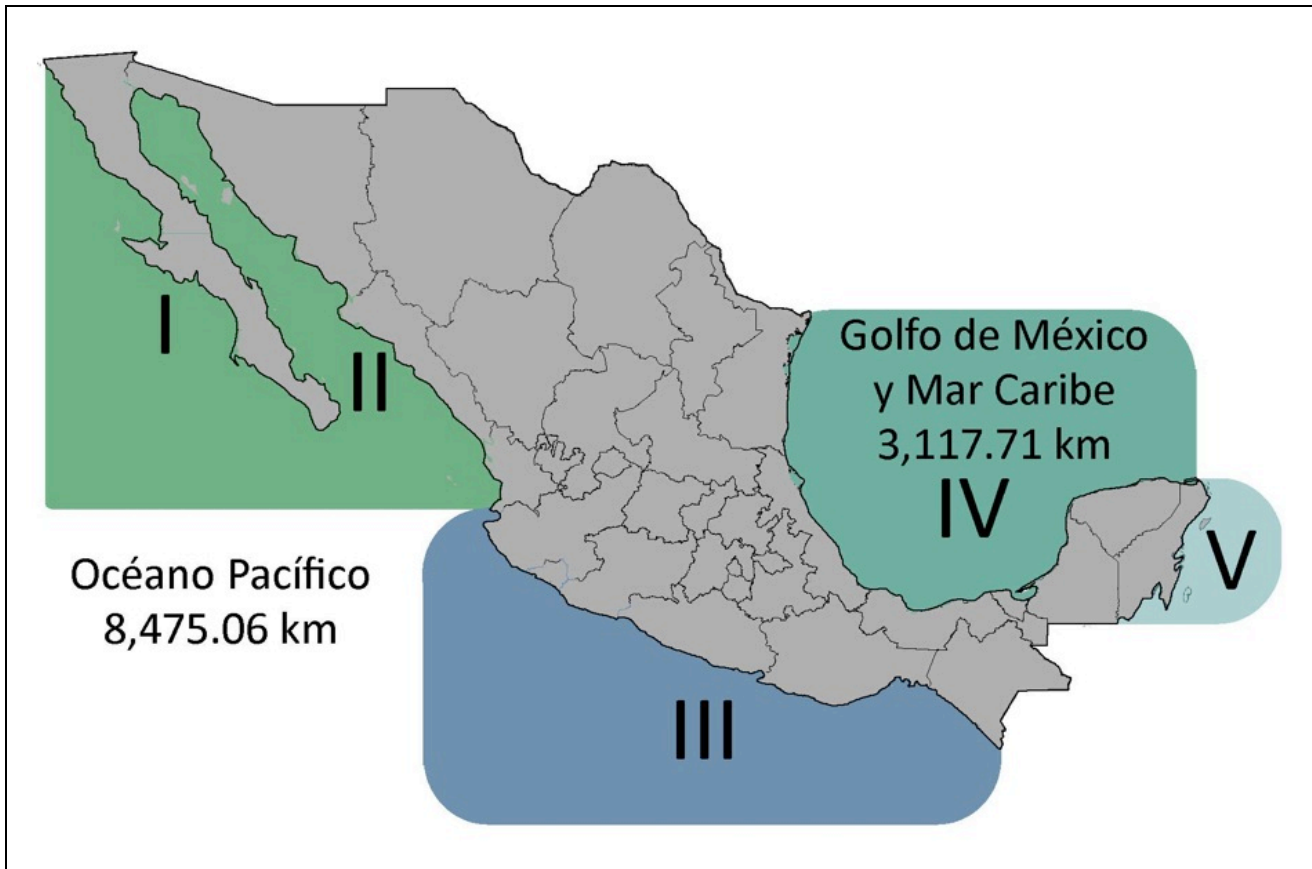


Figura 2.37 Regiones costero-océánicas de México (Rivera Arriaga y Villalobos Zapata, 2001)

Considerando los avances logrados por los estudios mencionados, se sugiere que la gestión de la zona costera en la actualidad esté basada en una nueva zonificación, que retome lo mejor de dichos enfoques y que esté fundamentada en las características físicas de las partes marina y terrestre de la zona costera, tal como la propuesta por Espejel y Bermúdez (2009), que a su vez, está basada en el trabajo de Escofet (2006a) (ver Figura 2.38).

La diferencia con la propuesta de Espejel y Bermúdez (2009) es que en la metodología aquí implementada, se comienza por identificar las características de la zona terrestre, para posteriormente incluir las de la zona marina, esto último retomado del enfoque de Ortiz Pérez y de la Lanza Espino (2006). De tal forma que a partir de la integración de los resultados de la caracterización y clasificación realizadas (ver secciones 2.1 y 2.2), el litoral mexicano se dividió a escala nacional (1:2 000 000) en 14 zonas, definidas de acuerdo a su ubicación, tipo climático, geomorfología e hidrodinámica (Figura 2.39). La metodología consistió en jerarquizar las características de la zona costera, comenzando por la parte terrestre, en el siguiente orden: regiones climáticas, cuencas hidrográficas, topografía y geomorfología; seguidas de la hidrodinámica y los peligros, correspondientes a la parte marina. Se encontró que los resultados obtenidos coinciden plenamente con las regiones identificadas por Ortiz Pérez y de la Lanza Espino (2006), por lo que a continuación se describen las 5 regiones del Golfo de México y 9 regiones del Pacífico mexicano, tomando como base los resultados de dicho trabajo.

Espacio para la regionalización marina		Zona costera		Espacio para la regionalización terrestre
Franja de océano abierto	Franja de océano costero	Franja de planicies costeras		Tierras altas
Borde de plataforma a límite de Zona Económica Exclusiva	Plataforma continental (batimetría 200 m)	Franja de 0 m a isohipsa de 200 msnm (regiones ipsográficas costeras)		Municipios costeros
		ZOFEMAT-municipios costeros		Cuenca
	Franja de aguas de plataforma externa	Franja de aguas de plataforma interna	Franja costera Cuenca baja salobre y demás aguas marinas interiores: bahías, lagunas, esteros, caletas, puertos	Área de influencia cuenca alta
Predominantemente federal			Predominantemente federal y estatal	
Ordenamiento ecológico marino			Ordenamiento ecológico regional y local, ordenamientos territoriales estatal y municipal	
		Las nuevas administraciones costeras integrales sustentables (estatal asociado a municipal)		

Figura 2.38 Esquema de franjas para la regionalización de los mares mexicanos (Espejel y Bermúdez, 2009)

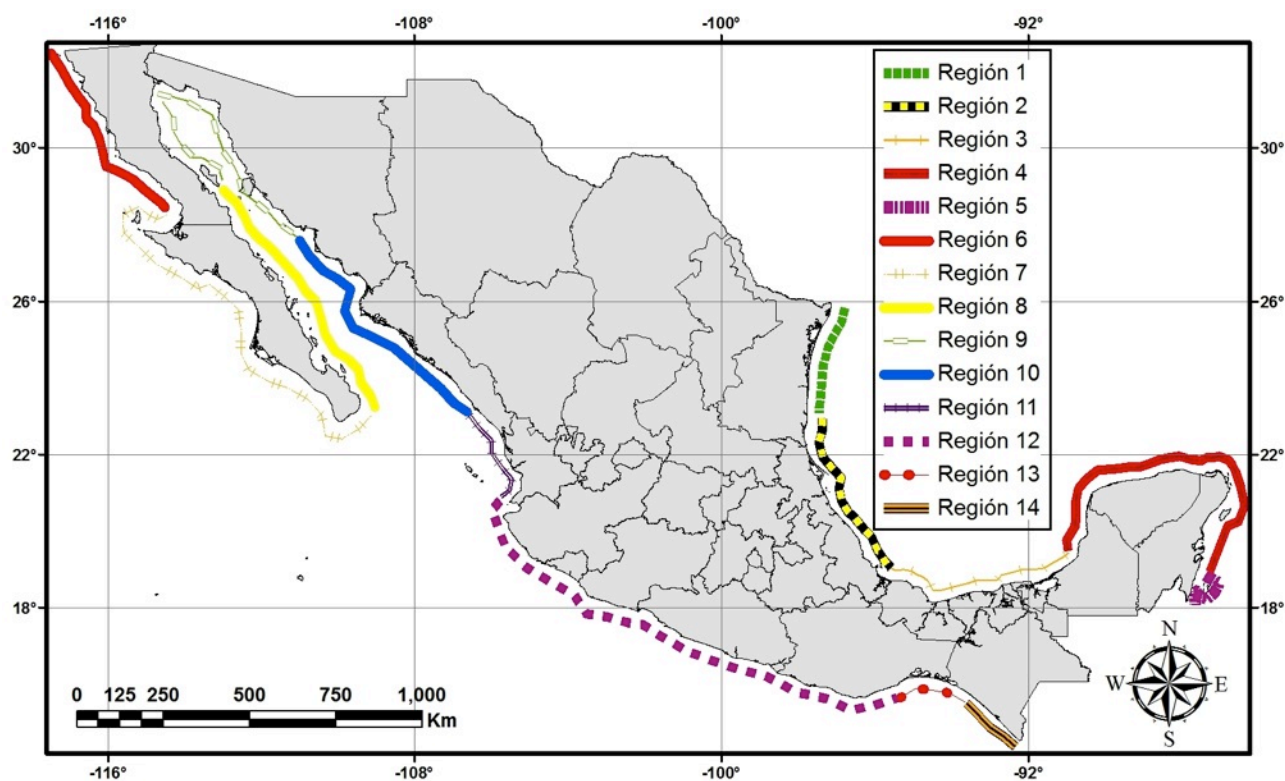


Figura 2.39 Zonificación propuesta de la zona costera mexicana (ver descripción de cada región identificada en texto)

A nivel nacional y sin considerar la anchura correspondiente a bocas lagunares (0.84%), México cuenta con una línea de costa de 23 914 km, de los cuales 43.62% (10 544.45 km) corresponde a su costa frontal, 45.11% (10 697.94 km) a su costa interior y el 11.27% (2 673.12 km) a la línea de costa de sus islas. Del litoral frontal, el 75.73% (7 984.66 km) corresponde a costas de arenas (arenas y gravas), el 22.38% (2 359.79 km) a costas rocosas (acantilados y terrazas) y el 1.89% (199.61 km) a bocas de lagunas. De la costa interior o de aguas protegidas, las barras interiores representan el 37.56% (4 017.72 km) y costa interior el 62.44% (6 680.21 km) (ver Tabla 2.6).

**Tabla 2.6 Distribución de tipos de costa en el litoral mexicano**

Región	COSTA FRONTAL				COSTA INTERIOR			ISLAS	
	Total (km)	ARENOSA %	ROCOSA %	ANCHURA DE BOCAS %	Total (km)	INTERIOR DE BARRA %	COSTA INTERIOR %	EXTERIORES (km)	INTERIORES (km)
Nacional	10544	75.7	22.4	1.9	10698	37.6	62.4	760.42	1912
01	724.47	45.53	54.47	0.00	86.32	31.49	68.51	3.22	0.00
02	1169.80	78.27	19.33	2.40	1253.28	32.18	67.82	7.42	121.23
03	1323.90	71.97	26.40	1.64	186.61	34.92	65.08	306.19	0.00
04	1112.47	47.85	50.43	1.72	47.19	46.08	53.92	134.07	0.00
05	998.84	81.00	14.28	4.72	2007.70	35.45	64.55	35.34	384.61
06	395.92	79.20	20.23	0.58	464.46	40.26	59.74	146.30	8.91
07	1528.17	71.27	27.77	0.96	1179.78	43.66	56.34	20.74	13.83
08	308.81	88.19	11.38	0.43	86.73	61.90	38.10	1.34	119.81
09	212.84	98.65	0.00	1.35	485.27	49.00	51.00	0.00	0.00
Pacífico	7775.22	69.77	28.47	1.77	5797.34	38.34	61.66	654.62	648.40
10	454.01	98.95	0.00	1.05	1633.69	30.22	69.78	0.00	799.20
11	675.09	90.34	7.82	1.84	613.93	47.65	52.35	43.42	175.28
12	390.34	94.88	0.00	5.12	739.05	35.41	64.59	0.00	111.38
13	650.27	93.60	5.72	0.68	941.56	45.47	54.53	2.70	30.36
14	599.13	87.10	9.43	3.47	972.37	32.80	67.20	59.68	148.09
Atlántico	2768.84	92.46	5.29	2.25	4900.60	36.63	63.37	105.80	1264.30

### Zona del Golfo de México

Comprende toda la cuenca del Golfo de México, la cual posee la plataforma continental más ancha del país. La región está influenciada por la corriente cálida de El Lazo, que proviene de la corriente de Yucatán, formando giros ciclónicos y anticiclónicos con ascenso y descenso de aguas. Esta zona está a su vez dividida en cuatro regiones:

*Región 1 - Costa Nororiental del Golfo de México*

El clima es semiárido y la precipitación media anual es de alrededor de 800 mm, con un período de lluvias no bien definido que se repite a lo largo del año.

La zona litoral está constituida por una costa acumulativa de playas bajas arenosas de configuración rectilínea de fisonomía monótona. En lo general los sedimentos son finos bien trabajados.

El sistema deltaico del río Bravo influye de manera definitiva en la geología del sector norte de la región nororiental de la costa, con un importante aporte de sedimentos, lo cual contrarresta los efectos del fenómeno de la subsidencia.

En el sector meridional de la costa, la isla barrera que resguarda a la Laguna Madre, al estar más alejada de la fuente de sedimentos que provienen del delta del río Bravo decrece en anchura y presenta un acarreo litoral uniforme con una circulación generalizada de norte a sur en el invierno, invirtiéndose la circulación en el verano pero de menor magnitud.

*Región 2 - Costa Centro Oriental del Golfo de México*

El clima es cálido-húmedo. En la porción norte la costa consiste en una amplia isla barrera que encierra a la Laguna de Tamiahua.

El transporte de sedimentos es dominante de Norte a Sur. La costa es de tipo acumulativo. En la porción central de la región dominan las costas con alternancia de márgenes arenosas y rocosas respectivamente.

La región volcánica de los Tuxtlas constituye el otro trecho con costas mixtas, las orillas rocosas son de dos tipos: uno de taludes acantilados sujetos al oleaje directo y el otro a un relieve bajo originado de la roca ígnea.

Entre el estuario del río Cazones y el de Nautla domina la expresión de playas bajas, en donde también es notable la degradación de las cuencas vertientes.

En la subregión desde el río Actopan hasta el límite con el río Jamapa, la línea de costa baja arenosa se encuentra precedida de amplios campos de dunas costeras.

El complejo fluvio-lagunar del río Papaloapan se caracteriza por una alta concentración de escurrimientos continentales favorecidas por el fenómeno de subsidencia de esta cuenca marginal que originan extensas lagunas, humedales de manglar y ciénagas.

*Región 3 - Costa Centro-Sur del Golfo de México*

Clima cálido-húmedo. Aquí se encuentran los principales sistemas deltaicos y estuarinos de la costa mexicana del Golfo.

Las corrientes se caracterizan por llevar una gran cantidad de sedimentos en suspensión, que al disiparse se depositan sobre la plataforma continental y junto con el surtidor del delta del Mezcalapa, constituyen los aportes de sedimentos más importantes del Golfo, en el territorio de México.

El complejo deltaico tabasqueño cuenta con un enorme espesor de sedimentos que se hallan en proceso de compactación natural e inducida por la extracción de hidrocarburos y su gas, originando una subsidencia de la estructura del terreno.



*Región 4 y 5 - Costa de la península de Yucatán y Mar Caribe*

El clima es cálido y durante todo el año la península está sujeta a la influencia de los vientos alisios del este y del noreste, en el verano y otoño la influencia más notoria es de los ciclones tropicales y en el invierno es la de los nortes.

Esta región se caracteriza por la ausencia de drenaje superficial o carencia de ríos, ya que el escurrimiento se lleva a cabo a través de la red del drenaje subterráneo, que en la llanura costera se manifiesta a través de manantiales cársticos (cenotes y/o Petenes), que le imprimen condiciones particulares a las marismas de la zona costera.

Una parte de las playas arenosas están en proceso de crecimiento y expansión con sedimentación activa como Punta Celestún y Punta Arenas.

El transporte de sedimentos es dominante en dirección al poniente.

En la zona del Caribe se presenta una corriente del mismo nombre, la cual produce una surgencia a su paso por el canal de Yucatán. Esta zona también se puede considerar como una única región morfo-hidrográfica con las siguientes características:

La presencia de una estrecha barrera arrecifal coralina paralela a la línea de costa de todo el estado de Quintana Roo, con una traza casi continua absorbe gran parte de la energía que proviene del Mar Caribe y provoca la presencia de una laguna de barrera arrecifal somera.

El hecho de no contar con una fuente continental de aporte de sedimentos importante, no impide una serie de procesos de sedimentación a nivel de fondo, pues las fuentes provienen de las costas de Centro-América y procesos biogénicos.

Es común encontrar amplios cordones de playa ya litificados o consolidados cubiertos con un manto de arenas sueltas que se extienden por toda la zona costera. La costa entre Cabo Catoche y Cancún es dominada por cordones arenosos de dunas y de playa

Las Bahías de Sian Ka'an constituyen un amplio humedal controlado por la cadena arrecifal, excepto en los tramos que comprende la entrada a las bahías.

La costa maya es el último tramo de costa frontal, con borde de cordón arenoso limitado por humedales y extensas ciénagas. La bahía interna de Chetumal representa el hundimiento geológico más sobresaliente.

Zona Costa Occidental de la Península de Baja California

Esta zona, influenciada por la corriente fría de California que desciende del norte, la cual produce surgencias a lo largo de la costa, se caracteriza por la existencia de numerosas bahías. Se encuentra subdividida en dos regiones:

*Región 6 - Costa del Pacífico Noroccidental*

En ella se presentan precipitaciones y escurrimientos débiles; no existe influencia significativa de tormentas tropicales; la costa está expuesta al oleaje distante intenso de forma constante, y por último, el transporte de sedimentos dominante es en dirección hacia el sur.

*Región 7 - Costa suroccidental de la Península de California*

Debido al basculamiento tectónico, gran parte de la costa está sujeta al hundimiento del terreno con excepción del extremo sur de la península, desde Todos los Santos hasta Cabo San Lucas. En esta zona existen largas y extensas islas barrera de playas bajas, planicies de inundación, campos de dunas, salitrales donde por lo general prevalece el relieve bajo.

Zona Golfo de California

El Golfo de California o Mar de Cortés, es un cuerpo de agua semi-cerrado, influenciado fuertemente por la circulación y el efecto de las mareas, con un gradiente batimétrico pronunciado, con un complejo sistema de circulación en el que interactúan la Corriente de California, la del Golfo de California y la costera de Costa Rica, la cual genera giros ciclónicos en la parte norte e importantes surgencias en las zonas cercanas a la costa. Esta zona está subdividida en tres regiones:

*Región 8 - Costa Oriental de la Península de California*

Clima seco desértico muy árido con lluvia escasa todo el año, con menos de 400 mm anuales. La configuración de la costa presenta muchas bahías pequeñas de bolsillo o ensenadas.

*Región 9 - Costa del Alto Golfo*

El clima es muy árido con muy escasa precipitación, menos de 300 mm al año. La desembocadura del río Colorado ejerce una influencia geomorfológica importante que condiciona las grandes planicies costeras. La Isla Tiburón, San Esteban y Punta San Gabriel marcan la frontera natural entre el Alto y el Bajo Golfo.

*Región 10 - Costa Oriental del Golfo Inferior*

Con clima seco desértico con lluvias en verano, posee una presencia importante de ambientes costeros lagunares, fuentes de agua y sistemas deltaicos que dominan los ambientes sedimentarios. En el sector norte se tiene una costa de planicies deltaicas antiguas e inactivas, constituidas por el complejo deltaico de los ríos Hermosillo, Yaqui, Mayo y Fuerte. Por otro lado, en el sector sur los ríos no forman deltas pero su sedimentación segmenta a las lagunas y esteros que se encuentran paralelos a la costa.

Zona Pacífico Tropical Mexicano

Influenciada por la corriente cálida de Costa Rica y en menor medida por las aguas frías descendentes de la Corriente de California, la región presenta una morfología irregular con un número importante de lagunas costeras, sistemas lagunares-estuarinos, bahías, barras y playas arenosas. Los procesos de subducción de piso oceánico le confieren a la región una alta sismicidad. La orientación espacial de la línea de costa, hace a la región susceptible al impacto de oleajes extremos provenientes del sur. Esta zona está subdividida en cuatro regiones:

*Región 11 - Costa Centro Occidental del Pacífico Mexicano*

La boca del Golfo de California es la zona de transición entre mar abierto sujeto a oleaje distante y la salida del Golfo de California de condiciones energéticas más bajas.

Clima cálido subhúmedo de lluvias en verano, en cuyo valor anual de la precipitación oscila de 800 mm en el sector Norte, hasta poco más de 1 500 mm en el Sur. La región se localiza abajo de la latitud del Trópico de Cáncer; cerca de la mitad de las lluvias acumuladas anualmente se originan por el monzón que se produce en el verano o mitad caliente del año. Los ciclones tropicales constituyen el segundo factor de la producción de la precipitación, toda vez que pasan cada año frente a la costa Centro Occidental. Esta costa se encuentra sujeta al oleaje de tormentas tropicales y huracanes.

Los ríos Santiago, Acaponeta y San Pedro, entre otros, favorecen la existencia de pantanos, planicies de inundación y lagunas costeras conocidas como Marismas Nacionales que, por su extensión y valor ecológico, son los humedales más importantes del Pacífico Mexicano.

#### *Región 12 - Costa Suroccidental del Pacífico Mexicano*

El clima es tropical seco con tres o cuatro meses de lluvia en el verano y climas subhúmedos con lluvias en verano. La distribución de las lluvias en la costa es variable, pues oscila desde los 400 en el Sector Norte hasta los 1000 mm en el Sector Sur.

Presenta un ambiente geológico asociado a una tectónica de tipo convergente de colisión continental de placas (subducción).

El oleaje dominante es del tipo distante.

#### *Región 13 - Costa del Golfo de Tehuantepec*

Geológicamente corresponde a una costa de choque o colisión entre la Placa Oceánica de Cocos y la Americana de naturaleza continental.

#### *Región 14 - Costa meridional del Pacífico Mexicano*

La generalidad de las playas, de arena, son de textura gruesa y media, de fuerte pendiente. El transporte de sedimentos es dominante en dirección SSE hacia el Golfo de Tehuantepec. El oleaje dominante es de tipo distante de alta energía proveniente del sur. La zona costera supralitoral corresponde al tipo de barrera.

### **2.4.2. Delimitación de límites marinos y terrestres**

Dada la variedad de ambientes costeros, definir los límites de la zona costera es sumamente complejo, por lo que diferentes países han adoptado diferentes métodos. Aquí se hace un recuento de estos con la finalidad de proponer una estrategia de delimitación aplicable a México.

Uno de los métodos más utilizados para establecer los límites de la zona costera es el uso de mapas topográficos y batimétricos para delimitar la zona costera con base en alturas y profundidades designadas arbitrariamente.

En Malasia, en 1996, se definió la zona costera como la totalidad del área que está por debajo del contorno de los 60 m, mientras que el límite marino quedó delimitado por el área cubierta por la Zona Económica Exclusiva. Por otra parte, Lindeboom (2002), menciona que estos límites son desde los 200 m sobre el nivel del mar, hasta los 200 m por debajo del nivel mar. Escofet (2006b) y (Espejel y Bermúdez, 2009) sugieren que la zona costera dentro del continente esté limitada por la ZOFEMAT (Zona Federal Marítimo Terrestre) en el lado del mar y los 200 m de altitud. En realidad no existe un acuerdo en cuanto a las cotas a utilizar; sin

embargo, este método es muy aceptado por su practicidad en términos administrativos. Su desventaja es que permite la inclusión de algunos, pero no todas las interacciones marino-terrestre (Pastakia, 2011).

Otro método es usar los límites administrativos de las áreas con línea de costa, para el lado terrestre (municipios costeros, en el caso de México), y los límites reconocidos internacionalmente para las partes marinas. Este sistema es conveniente administrativamente, pero no considera las condiciones naturales y las influencias entre los ambientes marinos y terrestres (Saavedra, 2004).

Un tercer método es el uso de ecosistemas para delinear las fronteras terrestres en áreas donde la influencia humana es poca. En estos casos el problema ocurre cuando estas áreas comienzan a desarrollarse y se deben considerar los cambios en el ecosistema derivados de las actividades humanas y su influencia (Pastakia, 2011).

Otro método sugerido para determinar los límites terrestres de la zona costera es el alcance de la influencia de los flujos de marea en los sistemas ribereños. La influencia de las mareas o el alcance de la cuña salina es indicativo de los límites de la influencia mareal en el sistema ribereño, lo cual a su vez, es indicativo del límite de la zona costera. Esta es una solución atractiva; sin embargo, aún requiere la utilización de límites arbitrarios para completar el polígono de la zona costera. Este método se puede complementar con información morfológica, haciéndolo uno de los más precisos, aunque esto requiere el conocimiento a detalle de las zonas hidro-geomorfológicas y sus influencias.

La conclusión es que, para fines de gestión costera, los límites de la zona costera se deben definir localmente, y deben considerar no sólo sus características morfológicas, hidrodinámicas y ecológicas, sino también el rango completo de actividades e intereses que afectan esta zona; identificar estas actividades y sus impactos, es el primer paso para controlarlas e integrarlas a la visión propuesta para el manejo de la costa.

La delimitación en la parte continental dependerá del alcance hasta donde se manifiestan los procesos oceánicos, debiendo estar dicho límite definido a nivel de cuenca hidrológica para cada caso en particular. Bajo esta consideración habría que definir dicho límite tierra adentro con base en los eventos geológicos e hidrometeorológicos de origen marino (mareas astronómicas, mareas de tormenta, remonte del oleaje, tsunamis, etc.) y su influencia directa tierra adentro, apoyado en los modelos topográficos y en los mapas de riesgos y vulnerabilidad por inundación.

Tomando lo anterior en cuenta, se proponen que la delimitación de la zona costera en nuestro país esté dividida en dos escalas; a nivel nacional y a nivel local. Para la primera se recomienda delimitar la zona costera entre la plataforma continental (200 m de profundidad) en el lado del mar, y la superficie más pequeña que genere desde los límites de la Zona Federal Marítimo Terrestre hasta los 200 m de altitud o 200 km de distancia. Esta delimitación es demasiado general para aplicarla a nivel local, por lo que en este documento también se propone un sistema de delimitación basado en la consideración de las características físicas y socio-económicas de la zona costera a nivel local. La metodología propuesta para definir los límites a nivel de Unidad de Manejo (UM) es mediante una matriz de variables que permite definir los alcances marinos y terrestres de la UM de forma precisa. Para tal fin se propone jerarquizar la información referente a la caracterización, de acuerdo a sus escalas, de tal forma que se comience con un área grande (regiones identificadas en la sección anterior, a través de la zonificación), que se vaya refinando al considerar los factores a escala local. De esta forma, se pueden definir las siguientes áreas territoriales de la zona costera:

- a. *Regiones* - áreas de características físicas homogéneas donde sus límites hacia mar y hacia tierra son la plataforma continental y los 200 m de altitud, respectivamente.
- b. *Unidad de Manejo* – son los límites que representan el estado y organización de las zonas costeras. Su delimitación incorpora características naturales (elevación, geología, ecología, etc.) y socio-económicas (nivel de turismo, uso de suelo, etc.).

Las categorías de características a nivel UM se definen de la siguiente forma:

- Las elevaciones se clasifican en tres grupos: zona marina (de la plataforma continental hasta la pleamar), planicies costeras (de la pleamar a 60 m sobre el nivel medio del mar) y zonas montañosas (con elevaciones superiores a los 60 m).
- El uso de suelo en la zona costera se divide en urbano, rural y área natural protegida.
- Cuenca de drenaje, la cual se puede extender tierra adentro más allá de los límites cuando estos son establecidos arbitrariamente.
- Dado que el turismo es una actividad de gran importancia en la zona costera y que es también una de las que mayor presión impone sobre ésta. Se recomienda incorporar, como una consideración más, la presencia de sitios turísticos.

En el caso de la Unidad de Manejo, además de los límites terrestres y marinos, también es importante demarcar los alcances de ésta a lo largo de la costa. Para fines de manejo, se recomienda que la UM corresponda con los límites de la celda litoral, donde una celda litoral es un compartimento de la costa que es independiente en términos de transporte sedimentario de los compartimentos adyacentes. Adicionalmente, la celda litoral se caracteriza por tener sus propias fuentes y sumideros de sedimento, así como por estar delimitada por rasgos geomorfológicos como puntas rocosas o bocanas. La delimitación precisa de una celda litoral requiere de un estudio de los patrones de transporte, el balance sedimentario y las características geomorfológicas para cada caso, lo cual no siempre es posible. De tal forma que, para fines prácticos, cuando la información a nivel local sea limitada, se sugiere que dicha delimitación esté basada en el tipo de costa (ver clasificación presentada en la sección 2.2.1): costas rocosas, bajas arenosas y mixtas.

Para delimitar la UM (tanto a lo largo como a lo ancho de la zona costera), todas estas características deben ser tomadas en cuenta mediante un análisis por capas con sistemas de información geográfica. Para realizar el análisis, las características deben estar en forma de polígonos, líneas o rasters, los cuales son superpuestos para encontrar el alcance de la UM y su área total (Balaguer *et al.*, 2008).

La disponibilidad de datos a nivel local puede ser un gran problema para la identificación de los límites hacia mar y hacia tierra de las Unidades de Manejo, por lo que en este documento la metodología propuesta se aplica solamente en dos casos de estudio, presentados en el Capítulo 4.

## 2.5. Identificación de ambientes costeros

En el contexto de este documento, se entiende por ambiente costero aquel definido por la combinación de sus características hidrodinámicas, geomorfológicas y ecológicas, de tal forma que se va más allá de lo propuesto por otras clasificaciones meramente ecológicas (Sarukhán *et al.*, 2009) o basadas únicamente en el mecanismo generador (Shepard, 1973), tan utilizadas con anterioridad.

En la Figura 2.40 se muestra el proceso de análisis seguido para la identificación de los ambientes, donde la jerarquía es: 1. hidrodinámica; 2. geomorfología (rasgos geomorfológicos); y 3. ecosistemas, en ese orden. La razón de apearse a dicho orden es que, tal como lo describen Davis y Hayes (1984), Guillén y Díaz (1990) y Brommer y Bochev-van der Burgh (2009) en la evolución presente de la costa (no su formación), sobre todo en el caso de las costas bajas arenosas y mixtas (playas) que son las comunes en nuestro litoral, la hidrodinámica moldea a los rasgos geomorfológicos y no viceversa, es decir las formaciones responden a los procesos que las afectan. Asimismo, el tipo de ecosistemas encontrados, son el resultado de la combinación específica entre régimen energético y tipo de costa (baja arenosa, mixta y rocosa). Por ejemplo, en un ambiente deltáico, originalmente formado por procesos fluviales (terrestres), la combinación de un régimen macromareal (>4 m), con oleaje débil (>1 m), da como resultado una costa dominada por la marea, donde las estructuras principales tienden a ser perpendiculares a la costa, como el delta del Río Colorado en la parte norte del Golfo de California y, a su vez, en una zona de baja elevación como un delta, tienden a desarrollarse ecosistemas de marismas. Por otra parte, en desembocaduras de ríos, donde a diferencia del ejemplo anterior, el proceso dominante es el oleaje y no la marea, la estructura morfológica característica de una desembocadura que es un delta, no se formará o no estará tan desarrollada, pues el transporte litoral será mayor al transporte ocasionado por la entrada y salida de la marea al estuario. Con base en lo anterior, se interpreta que aunque el mecanismo generador de un tipo de costa puede ser el mismo (fluvial, en ambos ejemplos dados), los procesos que actúan para definir su evolución a largo plazo y la morfología resultante pueden ser distintos, siendo estos los que deben de ser considerados al evaluar cómo va a responder un ambiente ante una presión específica. Dado que los procesos dominantes son los que determinan el tipo de ambiente, las obras y/o actividades que se puedan emplazar en esos ambientes responderán antes esas condiciones imperantes y repercutirán en la fisonomía de la costa.

Considerando lo anterior, se han propuesto una serie de rangos para caracterizar cada región de forma jerárquica, de acuerdo a sus condiciones hidrodinámicas, geomorfológicas y ecológicas, siguiendo las clasificaciones presentadas en las secciones previas. Los rangos hidrodinámicos se definieron con base en la clasificación por proceso dominante de Davis y Hayes (1984), mientras que los rangos geomorfológicos corresponden a los principales rasgos o elementos geomorfológicos identificados para los tres tipos de costa (baja arenosa, mixta y rocosa). Finalmente, en los rangos correspondientes a los ecosistemas se excluyeron a las lagunas costeras, incluidas como un ecosistema en la clasificación ecológica presentada previamente, pues para fines de la identificación de ambientes, se ha preferido considerar a las lagunas costeras como un rasgo geomorfológico (Lankford, 1976).

Estos rangos, utilizados para generar la clasificación por tipo de ambiente, mostrada en la Figura 2.38, están basados en las clasificaciones de la costa presentadas en sección 2.2 y son los siguientes:

#### Condiciones hidrodinámicas

1. domina marea (alto)
2. domina marea (bajo)
3. energía mixta (domina marea)
4. energía mixta (domina oleaje)
5. domina oleaje

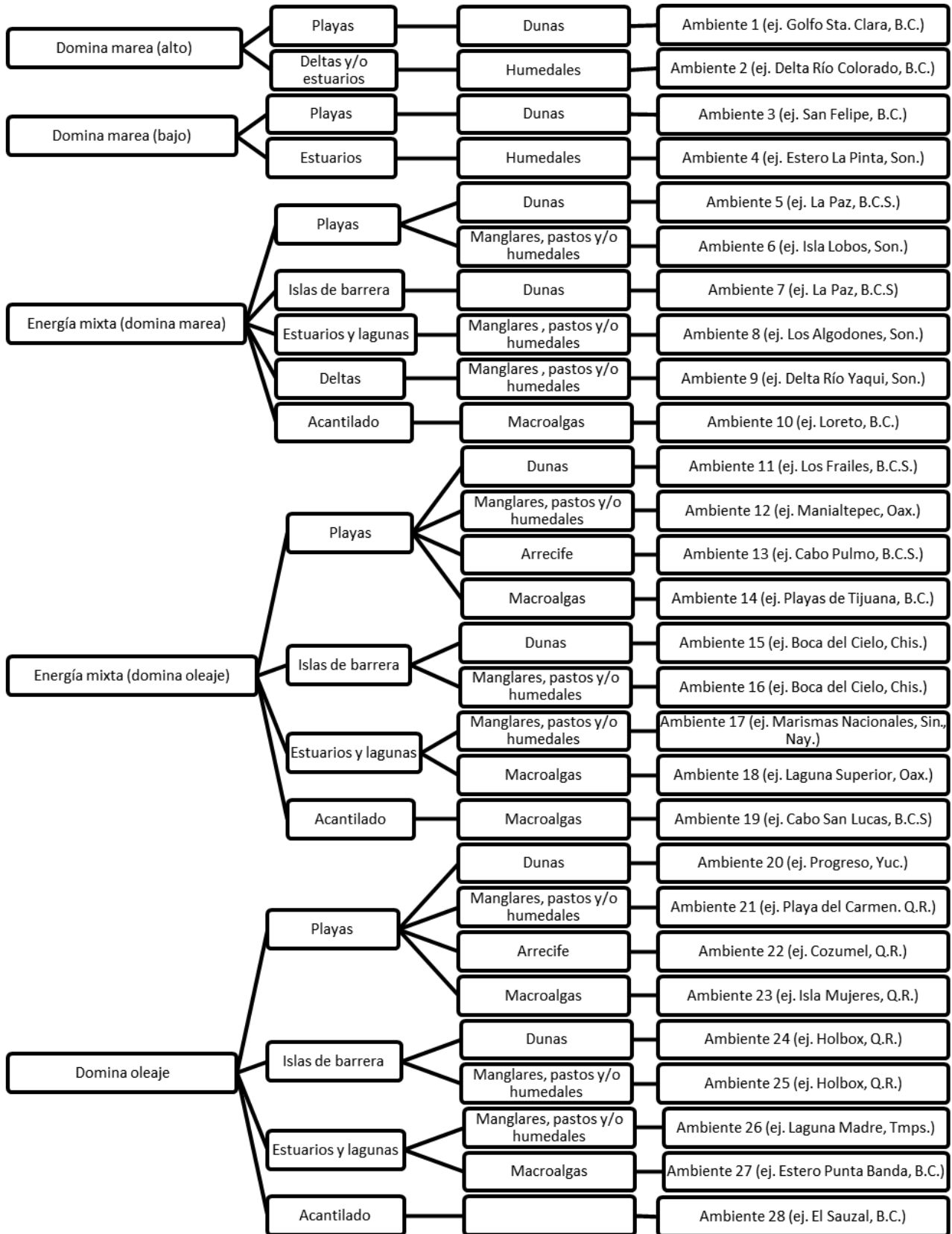


Figura 2.40 Esquema propuesto para la identificación de ambientes costeros característicos de México

### Geomorfología (rasgos geomorfológicos)

1. playa (costa baja arenosa y mixta)
2. isla de barrera (costa baja arenosa)
3. estuario o laguna costera (costa baja arenosa)
4. delta (costa baja arenosa)
5. acantilado rocoso o sedimentario (costa rocosa)

### Ecosistemas

1. manglares y pastos marinos
2. humedales
3. dunas
4. arrecifes
5. macroalgas

Es importante hacer la aclaración que los ambientes descritos son el resultado de las condiciones reinantes, no obstante, dentro de alguno de ellos pueden presentarse variantes en determinadas localidades que reflejarían o caracterizarían a otro tipo de ambiente. De tal forma que aunque, en general, ciertas condiciones hidrodinámicas son indicativas de ciertos tipo de costa (en términos geomorfológicos), en el mundo se pueden presentar todas las permutaciones, encontrando varias excepciones a lo esperado, como la costa de Washington y Oregon en Estados Unidos, donde a pesar de presentarse un gran rango mareal (-4 m), también existe oleaje de gran energía, presentándose formas más distintivas de una playa donde el oleaje es el proceso dominante y no la marea, con presencia de islas de barrera y poca presencia de deltas (estos últimos característicos de rangos mareales grandes, pues son las corrientes de flujo y reflujo las que crean dichas estructuras deposicionales). La razón de estas 'excepciones a la regla' es que además de la marea y el oleaje, la morfología está determinada por otros factores como el prisma mareal, la disponibilidad de sedimento o la influencia de ríos cercanos; sin embargo, por motivos de practicidad, dichos factores no se incluyen en la clasificación propuesta en la Figura 2.40, donde se pueden identificar todas las combinaciones que se presentan en la costa de México y los 28 ambientes resultantes.

En el sistema propuesto, cada ambiente identificado ha sido relacionado con un ecosistema característico y con un ejemplo representativo; sin embargo, es importante recalcar que los ecosistemas relacionados a cada tipo de ambiente no necesariamente se tienen que presentar, es decir, aunque se ha incluido a las dunas como características de los ecosistemas de playa, esto no significa que existan dunas en todas las playas. Por el contrario, en aquellos casos en que las características hidrodinámicas y geomorfológicas son conducentes a la presencia de varios ecosistemas, estos se han agrupado en un solo ambiente. Un ejemplo son los pastos marinos, manglares y humedales, que frecuentemente se presentan de manera simultánea en un ambiente particular; tal es el caso del ambiente número 6, un ambiente de playa sujeta a energía mixta, donde domina la marea, como Isla Lobos en Sonora, y donde se presentan tanto manglares, como pastos marinos y humedales. Todos estos ecosistemas requieren de las mismas condiciones hidrodinámicas para formarse y subsistir, y van a responder de forma similar ante impactos similares, tales como afectaciones al flujo o incremento del nivel del mar, por lo que es aceptable agruparlos en un solo ambiente.





### 3. Análisis de impactos en el desarrollo de obras y actividades por tipo de ambiente

El modelo *PER* fue desarrollado por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés) (OECD, 1991; OECD, 1993) como marco de referencia para la creación de sus políticas ambientales. Este modelo postula que las actividades humanas ejercen *presiones* sobre el ambiente, afectando la cantidad y calidad de los recursos naturales (*“estado”*), lo que a su vez genera o requiere una *respuesta* de la sociedad. Las respuestas pueden ser de índole ambiental, económica, de regulación, o inclusive a través de la concientización de la población. Frecuentemente, las respuestas son retroactivas, es decir, se retroalimentan con el estado. La utilidad de este enfoque radica en que se centra en las relaciones *causa-efecto*, lo que permite tanto a la población como a los generadores de políticas ver cómo se relacionan los factores socio-económicos y ambientales entre sí. Por otra parte, el modelo *PER* tiene la ventaja de ser uno de los más fáciles de entender y de usar, así como de ser neutral, ya que solamente identifica las relaciones entre factores, pero no si éstas tienen una influencia positiva o negativa en el ambiente.

Posteriormente, siguiendo el modelo Presión-Estado-Respuesta (*PER*, ver Figura 3.1), se realizó un análisis de los principales impactos que las obras y/o actividades pueden generar en cada tipo de ambiente (ver Tabla 3.2).

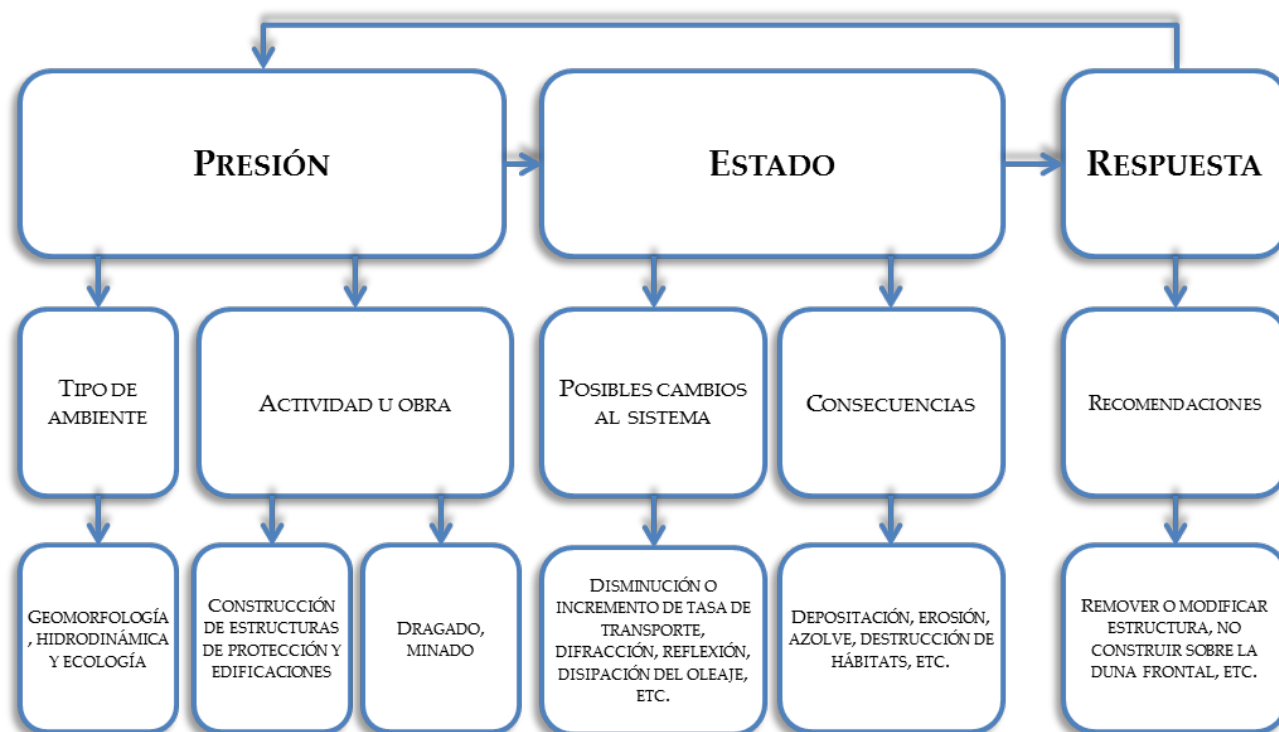


Figura 3.1 Modelo PER de evaluación de impactos por tipo de ambiente costero

Algunos de los problemas principales de las zonas costeras de México son la pérdida de hábitat en zonas intermareales, dunas o acantilados, debida a la deforestación, al cambio de uso de suelo para desarrollos urbanos, portuarios y turísticos, la minería o la extracción de materiales utilizados como relleno en la construcción; la desaparición de humedales por cambios en el uso de suelo, o el azolvamiento o sedimentación, resultado de cambios cuenca arriba, entre otros.

Para los fines del análisis presentado en la Tabla 3.2, se limitó la lista de *Presiones* consideradas a actividades y obras que afectan la morfodinámica de la zona costera (listadas en la Tabla 3.1), tal como la construcción de espigones, rompeolas, muros, represas, carreteras y edificaciones en general, y a actividades como dragado y minado de playas; en el caso del *Estado*, se consideraron los posibles cambios inducidos por dichas presiones y sus consecuencias, tales como la disminución o incremento de la tasa de transporte, cambios en las corrientes, erosión etc.; y finalmente, como *Respuesta* se propone una serie de recomendaciones y medidas de mitigación, aplicables a cada tipo de ambiente identificado (ver definición de ambiente en sección previa).

Es importante recalcar que el propósito de este estudio es evaluar los impactos, desde la perspectiva de la morfodinámica, es decir, la interacción entre las condiciones hidrodinámicas de un lugar (oleaje, mareas, corrientes) y su morfología, de tal forma que en esta parte del análisis no se incluye de forma detallada el punto de vista ecológico o socioeconómico. Asimismo, en virtud de que las costas rocosas (tanto bajas como acantiladas) están sometidas a menor uso y normalmente evolucionan en escalas de espacio y tiempo más difíciles de controlar por el ser humano, esta sección se centra solamente en los procesos que ocurren en las costas sedimentarias que, además, corresponden a la mayor parte del litoral (ver sección 2.4.1, de zonificación del litoral).

A continuación, en la Tabla 3.1, se listan y describen de forma general y a manera de sustento técnico para el análisis posterior algunas de las principales presiones consideradas en el análisis PER. Adicionalmente a la información presentada en esta tabla se incluyen a nivel de ejemplo una serie de figuras ilustrativas de los cambios que pueden ocurrir en el sistema como consecuencia de cada obra o actividad (Figura 3.2 a Figura 3.7). En estas figuras se presentan, a nivel esquemático, los posibles efectos que producen las diferentes obras como espigones, rompeolas, muelles, muros verticales, tuberías expuestas y enterradas, etc. en la hidrodinámica y transporte de sedimentos.

Además del efecto de la interrupción de los flujos (agua, sedimentos, nutrientes, etc.) por la construcción de presas, caminos y carreteras, entre otros, en México, las afectaciones a la zona de playa más frecuentes se deben a la alteración de zonas de dunas o interrupción del transporte de sedimentos longitudinal, tal como se ilustra en los siguientes ejemplos. En los esquemas, el transporte de sedimentos se muestra con flechas color beige y en los casos en que el transporte de sedimentos se ve interrumpido, la erosión se indica con un área rayada, mientras que la depositación se representa en color beige claro. Las flechas color negro indican la dirección de aproximación del oleaje que causaría la condición observada, donde las líneas transversales representan el frente de ola.



En la Tabla 3.2 se presentan los elementos técnicos y recomendaciones para el emplazamiento de obras y actividades por tipo de ambiente identificado. Los ejemplos dados son representativos de las condiciones y problemática observada en la mayor parte del país.



Tabla 3.1 Descripción de las principales actividades y obras consideradas en el análisis PER

Actividad/obra	Descripción
Rompeolas	<p>La función principal de un rompeolas es disipar la energía del oleaje, por ende también influye en las corrientes y el transporte de sedimentos.</p> <p>Los rompeolas pueden ser emergidos o sumergidos, pueden tener una gran variedad de formas y longitudes y pueden estar conectados a la costa o separados de ésta. En el contexto de este estudio, los rompeolas conectados a la costa, como aquellos utilizados para generar zonas de calma en los puertos, se clasificarán como escolleras (ver abajo).</p> <p>En el caso de los rompeolas separados de la costa, estos se construyen para proteger la zona frontal de la línea de costa que se encuentra paralela al rompeolas, ya que estos disipan y reducen la cantidad de energía que incide sobre la costa. Como objetivos secundarios, se construyen para darles uso de trampas de sedimento o muelles.</p>
Escolleras	<p>Tienen como función principal, la disipación del oleaje y la generación de zonas de calma o protegidas.</p> <p>Las escolleras son estructuras emergidas, conectadas a la costa, que pueden tener una variedad de formas y longitudes. Se utilizan, en la mayoría de los casos, para generar zonas de calma en puertos, estabilización de canales de navegación y como muelles. Adicionalmente, tienen el efecto de actuar como barreras al transporte de sedimento, generando acumulación corriente arriba, un efecto similar al ocasionado por los espigones terminales (ver abajo).</p>
Espigones	<p>Tienen la función de bloquear el transporte de sedimento paralelo a la costa, generando acumulación entre las estructuras. Se utilizan cuando los procesos de transporte paralelo a la costa son dominantes y resultan en erosión de ésta.</p> <p>Los espigones son estructuras conectadas a la costa de forma perpendicular. Pueden ser emergidos o sumergidos y se colocan tanto individualmente como en grupos. En los casos de 'campos' de espigones generalmente se coloca un espigón terminal, que es un espigón más largo, al final de la celda litoral para evitar que el sedimento se pierda por completo. Adicionalmente, en muchos casos,</p>



	<p>se complementan con alimentación artificial de playas.</p> <p>El diseño de un campo de espigones, incluyendo el número y espaciamiento de estructuras, su longitud y el tipo de material para su construcción, debe estar definido con base en información batimétrica, sedimentaria (características del sedimento y tasa de transporte) e hidrodinámica (oleaje y corrientes) local (CERC, 2000; Silva Casarín y Mendoza Baldwin, en prensa).</p>
Muelles	<p>Tiene la función de servir como estructura de atracado para embarcaciones marítimas. Pueden encontrarse conectados o separados a la costa, de forma perpendicular o paralela a ésta.</p> <p>También, dependiendo de las condiciones donde se construyen, pueden ser de estructura sólida o piloteada. La segunda opción tiene la ventaja de no interrumpir de manera importante el flujo hidrodinámico y el transporte de sedimentos.</p>  <p>Cozumel (Google Earth®)</p>
Puertos	<p>Los puertos son bahías artificiales o áreas protegidas ante el embate del oleaje y las corrientes mediante la construcción de estructuras como muelles y escolleras. Tienen la función de albergar embarcaciones pesqueras, de carga y pasajeros.</p> <p>Por sus dimensiones, generalmente tienen un gran impacto en la hidrodinámica y morfología de la zona. Las fuentes de estos impactos pueden ser de tres tipos: (a) ubicación; (b) construcción; y (c) operación y mantenimiento. La ubicación se refiere al lugar escogido para el desarrollo, que debe escogerse con base en las características hidrodinámicas y ecológicas, así como de uso de suelo de tierras adyacentes a la zona del desarrollo; la construcción, a actividades de construcción tanto en tierra como en el mar, dragado y transportación de materiales de construcción; y la operación incluye factores relacionados a la navegación tales como el tráfico, descargas contaminantes, emisiones y derrames, o al manejo de la carga. Algunos de los principales impactos son pérdida de hábitats, problemas de erosión corriente abajo y depositación corriente arriba, contaminación, eutroficación, cambios en la circulación y niveles de turbidez.</p> <p>Para su diseño, siempre es necesario hacer un análisis de sitios alternativos, así como asegurarse de que el sitio tiene suficiente espacio para el desarrollo y su futuro crecimiento. Adicionalmente, se debe hacer un estudio de la vulnerabilidad de los ecosistemas involucrados y su resiliencia (Cisco, 2003)</p>  <p>Veracruz (Google Earth®)</p>

<p>Marinas</p>	<p>Las marinas son áreas resguardadas del oleaje, utilizadas para el atraque de embarcaciones pequeñas, principalmente de tipo deportivo y recreativo. Para fines de este estudio se dividirán en dos tipos, dependiendo de su configuración; tierra adentro (lagunas, áreas dragadas, etc.) o sobre la costa (las que requieren rompeolas para hacer el área de resguardo. Las primeras se construyen en casos donde hay una bahía pequeña o algún otro tipo de entrada natural de agua, como un estuario o laguna costera, se puede aprovechar la morfología natural de la costa y colocar pasarelas y peines flotantes, donde se modifique poco la zona marina y la construcción en tierra sea lo más pequeña posible, sin rellenos o muros de contención. Por otra parte, en costas rectas, de gran energía, generalmente se opta por configuraciones similares a las de un puerto, pero en menor escala o dragar grandes áreas de tierra para generar una entrada de agua artificial. Ambos tipos tienen grandes impactos en el ambiente, en el primer caso se afecta principalmente la hidrodinámica natural del cuerpo de agua y se genera contaminación y resuspensión, en el segundo caso el impacto está relacionado más al cambio en la morfología natural de la costa y sus efectos, tales como destrucción de hábitats, incremento en la turbidez y cambios en la circulación por las actividades de dragado, y erosión diferencial por interrupción del transporte litoral.</p> <p>No cualquier sitio es apto para construir una marina. Para la elección de la ubicación se recomienda considerar sus características topográficas, batimétricas, hidrodinámicas y ecológicas, así como de uso de suelo de tierras adyacentes. Las características ideales son aquellas que asemejan una zona de refugio natural, es decir una zona profunda, protegida naturalmente del oleaje (por salientes, por ejemplo) y donde no se encuentren ecosistemas de conservación prioritarios.</p>	 <p>Marina Mazatlán</p>
<p>Muros</p>	<p>La función de un muro es proteger o estabilizar una sección de costa que sufre del impacto del oleaje o las mareas directamente. Generalmente se construye en lugares donde no hay playa o algún elemento morfológico natural significativo que separe la infraestructura del mar y su embate, o como protección ante eventos extremos como tsunamis o tormentas. Pueden ser de revestimiento liso (como una pared) o rocoso (más similar a un rompeolas), o una combinación de ambos.</p>	 <p>Cancún</p>

<p>Carreteras y Puentes</p>	 <p>Estero Sabancuy (Google Earth®)</p> <p>Las carreteras y caminos son infraestructura necesaria para permitir el acceso a regiones específicas con fines comerciales, industriales o turísticos y para comunicar comunidades; sin embargo frecuentemente su trazado y construcción se hace atravesando por ambientes o zonas inundables con presencia de ecosistemas frágiles, como humedales, lagunas costeras o inclusive dunas, afectando las condiciones naturales de la zona como el flujo hidrodinámico o de sedimento. Asimismo, al estar esta infraestructura cerca de la línea de costa, está sujeta al embate de eventos extremos, lo que puede resultar en graves y costosos daños. Tanto su impacto como su vulnerabilidad ante los procesos naturales de la zona costera pueden ser mitigados si en el diseño se incorpora el conocimiento de dichos procesos. Por ejemplo, se puede optar por un diseño piloteado o por un cambio de trazo que no afecte zonas frágiles.</p>
<p>Edificaciones</p>	 <p>Puerto Morelos (Google Earth®)</p> <p>Las edificaciones cerca de la línea de costa pueden ser de una gran variedad, desde construcciones permanentes como edificios industriales, habitacionales y de uso turístico, y zonas recreativas como andadores, hasta estructuras temporales como enramados y andadores de madera.</p> <p>Unas de las principales afectación se da en la estructura y función del sistema duna-playa y en la pérdida del hábitat en estos ecosistemas, no obstante otros efectos importantes en el sistema costero puede ser tan variado como los tipos de estructuras mismos y su ubicación con respecto a la línea de costa, por lo que en el análisis PER se incluirán una variedad de ejemplos, considerados como representativos. En todos los casos, el análisis se refiere específicamente a edificaciones construidas sobre la playa o el sistema de dunas. Algunos de estos son: casa habitación, hotel o edificio de uso público, andadores, etc.</p>

<p>Plantas termoeléctricas</p>	<p>Las plantas termoeléctricas funcionan a base de vapor de agua, el cual es calentado por un combustible (que puede ser fósil, como carbón o gas natural, nuclear, geológico o solar), este vapor hace girar una turbina que a su vez activa un generador eléctrico. Después de pasar por la turbina, el vapor es enfriado (con agua o en un condensador) y reciclado para volverlo a utilizar.</p> <p>La mayoría de las plantas termoeléctricas se construyen sobre la costa para poder usar el agua de mar como enfriador, desafortunadamente el agua es devuelta al mar con una temperatura mayor, lo cual puede tener graves efectos en la ecología de la zona, tales como la destrucción de poblaciones animales y vegetales locales (blanqueamiento de corales, por ejemplo).</p> <p>Adicionalmente, la infraestructura requerida para la operación de una planta termoeléctrica incluye obras de toma y descarga de agua, además de estructuras de protección costera, las cuales frecuentemente generan problemas de erosión por interrupción del transporte litoral o por socavación, en el caso de las tuberías.</p>	 <p>Rosarito (Google Earth®)</p>
<p>Tubos de toma de agua y desagüe</p>	<p>Las tuberías para toma y descarga de agua son parte fundamental de industrias de gran importancia, como plantas termoeléctricas, plantas desalinizadoras, plantas de tratamiento y sistemas de drenaje. Pueden ser sumergidas total o parcialmente o estar al ras del suelo o acantilado.</p> <p>Algunos de sus principales efectos en la dinámica y morfología de la costa son la recirculación, la contaminación química y termal, la interrupción del transporte litoral, posible asolvamiento y erosión a cada lado, erosión de acantilados sedimentarios, etc., todos ellos con potenciales consecuencias ambientales (SEPA, 2008).</p>	 <p><a href="http://www.action.surfrider.org">www.action.surfrider.org</a></p>
<p>Granjas acuícolas</p>	<p>La acuicultura se refiere a la reproducción a gran escala de especies de valor comercial, como el camarón, atún o trucha, en áreas confinadas construidas para tal fin en tierra, en el mar, o en lagunas y estuarios.</p> <p>El tipo de instalaciones varía dependiendo de la especie a comercializar; en el caso del atún aleta azul en Baja California, por ejemplo, se usa una de las técnicas menos invasivas en términos morfodinámicos, que es la instalación de 'encierros' flotantes, en zonas de aprox. 20 m de</p>	





	<p>profundidad. Esta técnica impacta poco las corrientes y la morfología de la costa, pero tiene graves consecuencias en términos de contaminación orgánica por desechos, cuando los encierros están demasiado juntos.</p> <p>En el otro extremo se encuentran las granjas de camarón que se construyen seccionando partes de lagunas o estuarios. Esta práctica es una de las más dañinas puesto que cambia el volumen del reservorio original y por tanto el prisma de marea (volumen de agua que entra y sale durante un ciclo de marea), lo cual, a su vez, afecta el balance sedimentario, provocando erosión o azolve, y puede inducir cambios en la morfología y número de bocas. Adicionalmente, esta práctica ha resultado en la pérdida de grandes áreas de humedales y otros ecosistemas de valor. También se pueden construir sobre la costa, en estanques excavados. En este caso es necesario construir obras de toma y descarga de aguas, las cuales casi siempre son canales que cuyas salidas al mar están protegidas por escolleras. Esto tiene un grave impacto en el transporte litoral de la playa.</p>
<p>Desalinizadoras</p>	<p>Las plantas desalinizadoras toman agua del mar, la someten a un proceso de remoción de sales, que puede ser destilación u ósmosis inversa, y al terminar vierten la salmuera resultante directamente al mar. Los impactos por vertido de salmuera (salinidad de 43 a 90 ups) afectan a los organismos bentónicos ya que la mayor densidad de la salmuera, provoca su hundimiento y un flujo laminar en el fondo litoral.</p> <p>Los efectos más significativos se producen sobre especies sésiles, como corales, algas y fanerógamas, que pueden sufrir el llamado “choque osmótico letal” por deshidratación irreversible de sus células. Los peces y otros organismos móviles no se ven afectados directamente, aunque sí por la reducción de sus fuentes alimenticias.</p>
<p>Dragado</p>	<p>Las actividades de dragado consisten en la remoción de sedimento para incrementar la profundidad de una zona específica para la construcción o mantenimiento de dársenas de puertos o canales de navegación.</p> <p>En función del tipo de sedimento en el fondo se utilizan diferentes tipos de dragas, pero generalmente se usan dragas mecánicas para remover el sedimento del fondo marino y</p>



	<p>excavadoras terrestres en los casos de playas. Algunos de sus principales impactos están relacionados a la resuspensión de material, incremento de la turbidez, cambios en los patrones de circulación por cambios batimétricos, remoción de fauna, destrucción de hábitat, asfixiamiento de comunidades bentónicas en los sitios de depositación del material y cambios en la cohesión del sedimento.</p> <p>Para el caso del dragado para extracción de material de construcción o relleno, independientemente del ambiente en el que se realice, se debe realizar una caracterización extensiva del sitio de dragado y sus recursos antes de realizar el proyecto. Los principales puntos a evaluar son:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a) determinar las dimensiones y ubicación óptimas del sitio de dragado (que pueden ser áreas pequeñas pero profundas o, por el contrario, áreas grandes y someras), en términos de utilización de recursos,</li> <li>b) evaluar las tasas de recuperación del sitio después del dragado,</li> <li>c) estimar los patrones y tasas de transporte de sedimento en el sitio, así como el ángulo de reposo de éste para determinar la estabilidad de las pendientes y del fondo marino adyacente,</li> <li>d) modelar y estimar el efecto de dragados a gran escala (espacial y temporal) en el fondo marino adyacente, playas y presupuesto sedimentario de la celda litoral, así como en las comunidades locales de flora y fauna.</li> <li>e) realizar una caracterización y modelaje del sitio para determinar el tamaño y profundidad del área de extracción que permiten una rápida y completa recolonización;</li> <li>f) utilizar modelos de dispersión de sedimento para estimar la resuspensión y dispersión durante el dragado.</li> </ol> <p>La información resultante se debe utilizar para diseñar las operaciones de dragado.</p>
<p>Minado</p>	<p>El minado de playas se realiza, tal como el minado convencional, para obtener agregados y minerales de gran valor económico. En el caso de las playas (de arenas, gravas y cantos rodados), la extracción se realiza a través de la remoción directa del material, mediante excavadoras.</p> <p>Esta actividad es una de las más destructivas pues modifica de forma radical las características de una playa, tanto en términos geomorfológicos, como ecológicos.</p> <p>En nuestro país esta actividad se lleva a cabo en estados como Chiapas, donde hay playas con altos contenidos de minerales como el titanio. En el caso de la extracción de cantos rodados, lo cual ocurre en grandes cantidades en Baja California, la extracción se realiza a mano y aunque su impacto es menor, se afecta la forma del perfil de playa, lo que disminuye su capacidad disipativa y fomenta la inundación de áreas adyacentes durante tormentas.</p>
<p>Relleno</p>	<p>Es el proceso a través del cual, el sedimento erosionado por el transporte litoral es reemplazado por sedimento cuya fuente está fuera de la celda litoral en la cual se deposita. El material depositado artificialmente debe ser similar en características</p>



	<p>al material original, por cuestiones estéticas y para mantener el balance entre los procesos hidrodinámicos y la morfología de la costa.</p> <p>Esta actividad generalmente se usa como complemento de un sistema de protección costera más grande, que frecuentemente incluye estructuras de protección. Es considerada una medida temporal pues los procesos erosivos que ocasionaron la pérdida de sedimento en primer lugar, no son modificados al aportar material nuevo, sino que estos continúan y eventualmente el sedimento vuelve a ser erosionado.</p>	
<p>Navegación</p>	<p>Dependiendo del tamaño y la velocidad máxima de la embarcación los impactos de la navegación pueden variar desde el incremento de tasas de erosión en zonas costeras confinadas, provocado por el oleaje de barcos de alta velocidad como ferris, hasta resuspensión de sedimentos, contaminación, daño a arrecifes, poblaciones de peces y mamíferos marinos.</p> <p>En el caso de lagunas y cuerpos de agua confinados el mayor problema estará asociado a la resuspensión de sedimentos y erosión, inclusive para embarcaciones motorizadas pequeñas, por otra parte, en aguas abiertas, el mayor daño está relacionado a la contaminación y daño por impacto por parte de embarcaciones mayores.</p>	

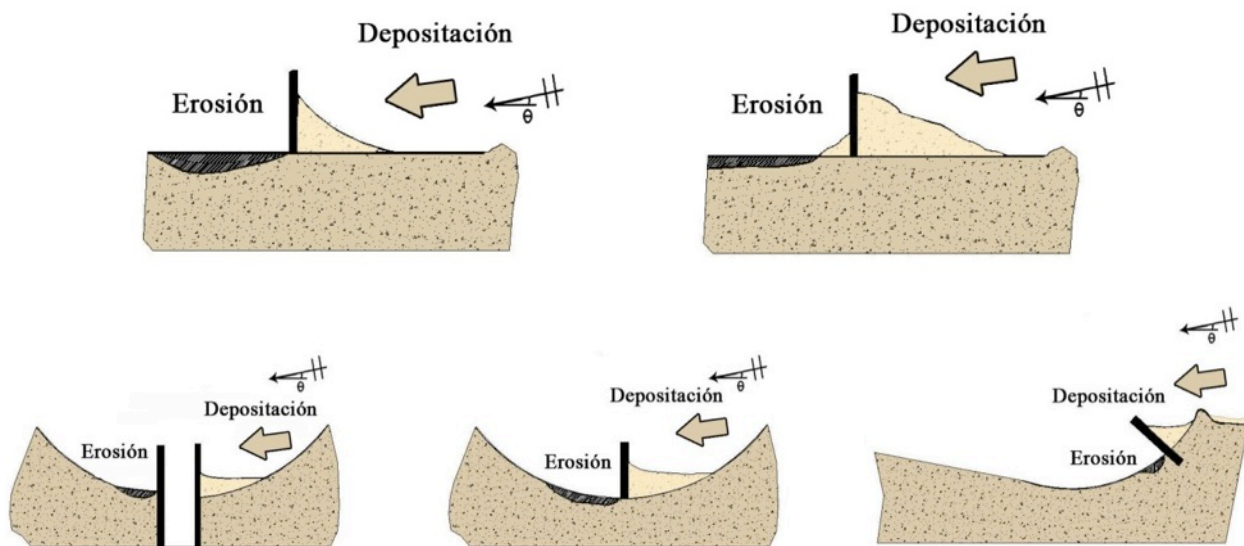


Figura 3.2 Efectos de los espigones en la hidrodinámica costera, para diferentes tipos de playa y configuraciones de estructuras (deposición corriente arriba y posible erosión en el canal y al otro lado de la boca, donde la dirección de transporte litoral está indicada por la flecha)

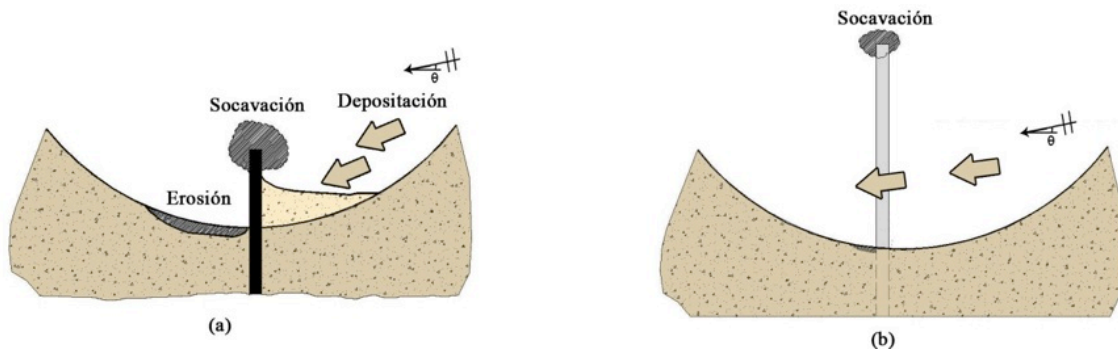


Figura 3.3 Efectos de las tuberías en la hidrodinámica, donde (a) el color negro indica una tubería expuesta y (b) el color gris, una tubería enterrada más allá de la profundidad de cierre del perfil de playa. En el primer caso se puede interrumpir el transporte y generar socavación al final de la tubería, mientras que ambos problemas se minimizan cuando la tubería se entierra hasta una profundidad mayor la profundidad de cierre

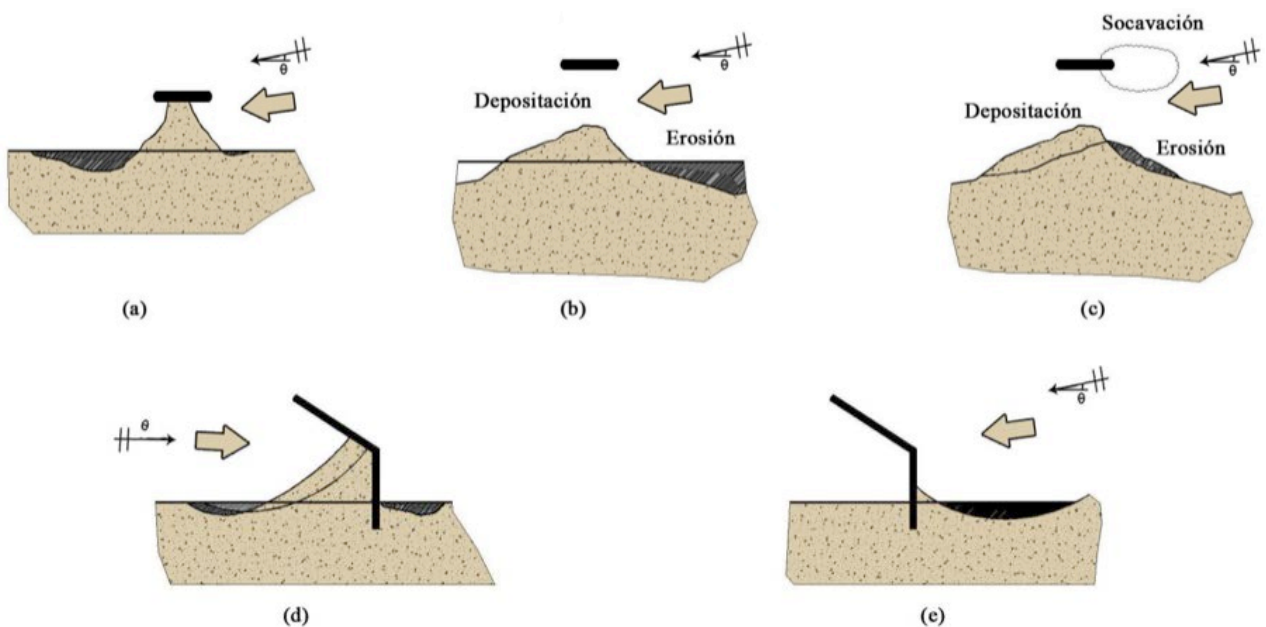


Figura 3.4 (a, b, c) Efectos de los rompeolas separados de la costa en la hidrodinámica (dependiendo de la distancia de la costa y orientación de la estructura, puede darse acreción en las playas, deposición en tómbolo, erosión corriente abajo y falla de estructura por erosión al pie de la estructura) y (d, e) efectos de los rompeolas conectados a la costa en la hidrodinámica (deposición corriente arriba y posible erosión al otro lado de la estructura, donde la dirección de transporte litoral está indicada por la flecha)

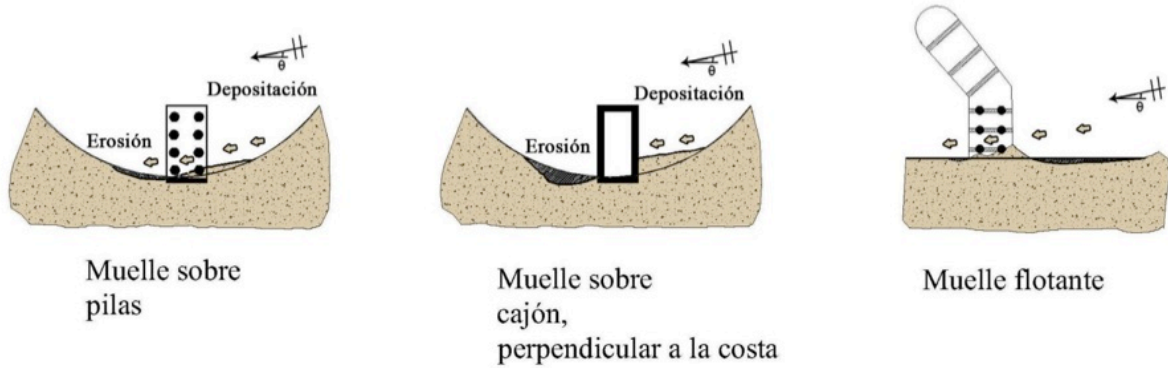


Figura 3.5 Efectos de los diferentes tipos muelles de atraque en la hidrodinámica de las playas (depositación corriente arriba y posible erosión al otro lado de la estructura, donde la dirección de transporte litoral está indicada por las flechas beige). El muelle sobre pilas es una de las opciones más comunes y aunque crea un efecto de sombra en las corrientes, genera un menor impacto en éstas y el transporte litoral que un muelle sobre cajón, perpendicular a la costa. El muelle flotante, por otra parte, es el que genera el menor impacto pero es menos utilizado pues requiere de condiciones de baja energía

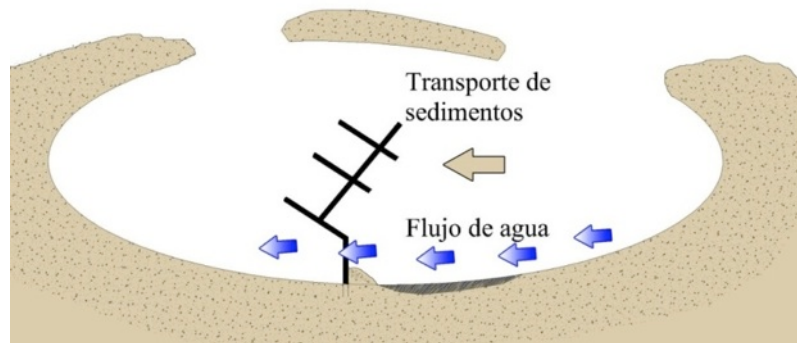


Figura 3.6 Efectos de los muelles flotantes (marinas) en la hidrodinámica de lagunas y estuarios (este tipo de estructura puede influir en los patrones de flujo de agua y de transporte de sedimentos en lagunas y estuarios)

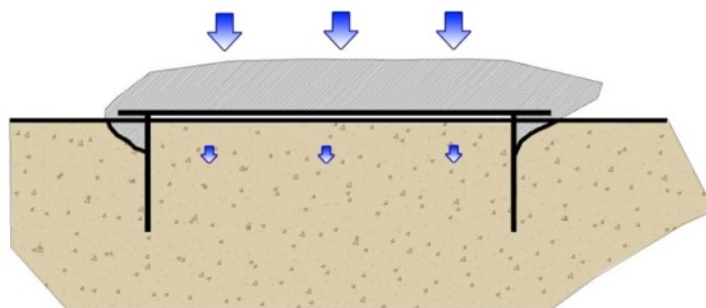


Figura 3.7 Efectos de los muros paralelos a la costa en la hidrodinámica y transporte de sedimentos (aumentan la reflexión y generan erosión frente al muro, falla por licuefacción y socavación a ambos lados)

**Tabla 3.2 Sistema PER de recomendaciones a impactos morfodinámicos de obras y actividades por ambiente costero identificado**

Actividad / obra	Tipo de ambiente	Cambios al sistema	Consecuencias	Recomendaciones
<b>Espigones</b>	# 1, 2: Playas y deltas, donde el proceso dominante es la marea, con posible presencia de dunas o humedales (ej.: Alto Golfo de California)	-Interrupción del transporte litoral -Retención de sedimento entre estructuras -Desplazamiento de las corrientes de marea hacia mar adentro	-Avance o mantenimiento de posición línea de costa -Erosión corriente abajo del campo de espigones, y en casos severos, a ambos lados -Efecto sobre bancos y barras de arena mar adentro	-Rara vez utilizados por la complejidad de predecir las corrientes inducidas por la marea cerca de la línea de costa, además de que los procesos de swash ocurren a lo ancho de una gran zona intermareal -No recomendado puesto que en este tipo de ambiente se da tanto transporte a lo largo como transversal a la costa y los espigones están diseñados para retener el transporte paralelo a la costa solamente -Dada la característica migratoria de los elementos que conforman este tipo de costas, se recomienda ubicar la infraestructura detrás del cordón de dunas frontales o humedales
<b>Espigones</b>	# 20: Playas rectas y bien definidas, donde el proceso dominante es el oleaje, con posible presencia de dunas costeras (ej.: Progreso, Yuc.)	-Interrupción del transporte litoral -Retención de sedimento entre estructuras -Cambios al perfil de playa	-Avance o mantenimiento de posición línea de costa -Erosión corriente abajo del campo de espigones, y en casos severos, a ambos lados -Incremento potencial de tasa de erosión si no se acompaña de alimentación artificial	-Utilizado donde los procesos de transporte litoral son dominantes y resultan en erosión de la costa -No recomendado si no hay infraestructura importante a proteger, en cuyo caso se recomienda remover el sistema de espigones -Si hay infraestructura importante, asegurarse que el sistema de espigones contenga un espigón terminal y abarque toda la celda litoral para evitar erosión diferencial -Ubicar infraestructura detrás del cordón de dunas frontales -Cuidar el espaciamiento entre estructuras, que de ser muy pequeño puede incentivar la erosión aún más
<b>Espigones</b>	# 21: Playas rectas y bien definidas, donde el proceso dominante es el oleaje, con presencia de manglares y humedales (ej.: Playa del Carmen o Xcabel, Q.R.)	-Interrupción del transporte litoral -Retención de sedimento entre estructuras -Cambios al perfil de playa -Cambios al flujo hidrodinámico	-Avance o mantenimiento de posición de línea de costa -Erosión corriente abajo del campo de espigones, y en casos severos, a ambos lados -Disminución de aporte sedimentario al sistema de manglar o humedales	-No recomendado en zona de manglar o humedales puesto que se puede alterar el balance hidrodinámico y sedimentario necesario para la supervivencia de los ecosistemas de manglar y humedales -Ubicar infraestructura detrás de ecosistema, que es la protección natural ante inundación y erosión -Si ya hay infraestructura importante, asegurarse que el sistema de espigones contenga un espigón terminal y abarque toda la celda litoral para evitar erosión diferencial -Cuidar el espaciamiento entre estructuras, que de ser muy pequeño puede incentivar la erosión aún más

<b>Espigones</b>	# 22: Playas rectas y bien definidas, donde el proceso dominante es el oleaje, con presencia de arrecifes (ej.: Cozumel, Q.R.)	-Interrupción del transporte litoral -Retención de sedimento entre estructuras -Cambios al perfil de playa	-Avance línea de costa y estructuras de transporte como barras arenosas -Erosión corriente abajo del campo de espigones, y en casos severos, a ambos lados	-El avance o retroceso de la línea de costa puede incrementar o disminuir la profundidad en la zona del arrecife, así como el aporte sedimentario hacia este sistema, afectando el balance necesario para su supervivencia (en Australia se ha utilizado junto con alimentación artificial como método para proveer la profundidad necesaria para el arrecife, al incentivar la acreción de la línea de costa). -Cuidar el espaciamiento entre estructuras, que de ser muy pequeño puede incentivar la erosión aún más
<b>Espigones</b>	# 24 y 25: Islas de barrera, donde el proceso dominante es el oleaje, con posible presencia de dunas o manglar (ej.: Holbox, Q.R.)	-Interrupción del transporte litoral -Retención de sedimento entre estructuras -Cambios al perfil de playa	-Avance línea de costa y estructuras de transporte como barras arenosas -Erosión corriente abajo del campo de espigones y, en casos severos, a ambos lados	-Si no hay infraestructura importante, remover el sistema de espigones -Si hay infraestructura importante, asegurarse que el sistema de espigones contenga un espigón terminal y abarque toda la celda litoral para evitar erosión diferencial -Ubicar infraestructura detrás del cordón de dunas primarias o zona de manglar, sin obstruir el flujo hidráulico -Cuidar el espaciamiento entre estructuras, que de ser muy pequeño puede incentivar la erosión aún más
<b>Espigones</b>	# 28: Acantilados de roca sedimentaria, con playa alimentada por material de acantilado al pie de éste y donde el proceso dominante es el oleaje (ej.: El Sauzal, B.C.)*	-Interrupción del transporte litoral -Retención de sedimento entre estructuras -Cambios al perfil de playa	-Erosión corriente abajo del campo de espigones y, en casos severos, a ambos lados	-Si no hay infraestructura importante, no colocar o remover el sistema de espigones y permitir erosión de acantilado -No se recomienda permitir el desarrollo de dichas ambientes puesto que impedir el retroceso del acantilado con espigones es sumamente costoso a corto y largo plazo, y de baja eficiencia -Si hay infraestructura importante, asegurarse que el sistema de espigones contenga un espigón terminal y abarque toda la celda litoral para evitar erosión diferencial -Generalmente sólo funciona exitosamente acompañado de un programa de alimentación artificial de la playa al pie del acantilado, puesto que se limita la fuente natural de sedimento, que es el acantilado mismo -Cuidar el espaciamiento entre estructuras, que de ser muy pequeño puede incentivar la erosión aun más
<b>Escollera</b>	# 26: Laguna costera o estuario (boca), donde el proceso dominante es el oleaje, con posible presencia	-Interrupción del transporte litoral -Atenuación de la energía del oleaje -Cambios a la	-Depositación corriente arriba y posible erosión en el canal y al otro lado de la boca, -Erosión o azolve	-Utilizado para estabilizar boca de laguna o estuario -Evaluar alternativa de mantenimiento de canal de navegación con dragado, de menor impacto en la hidrodinámica del sistema lagunar que la estructura permanente

	de dunas o manglar (ej.: Soto La Marina, Laguna Madre, Tmps.)	hidrodinámica del sistema lagunar (boca y cuerpo de agua) - Confinamiento de flujo de mareas y corrientes)	del sistema lagunar, impedimento de proceso natural de apertura y cierre de bocas	-Evitar en casos donde existe evidencia de bocas migratorias -En caso de presentarse erosión diferencial de la costa, se recomiendan prácticas de trasvase de sedimento
<b>Escollera (Puerto)</b>	# 20: Playas, con posible presencia de dunas, donde el proceso dominante es el oleaje (ej.: Ensenada, B.C.)	-Interrupción del transporte longitudinal -Atenuación de la energía del oleaje	-Depositación corriente arriba y abajo, cuando se construyen espigones al centro de playas cóncavas, -Erosión y/o azolve en dársena	-Utilizado para generar una zona de calma para abrigo de embarcaciones -Altera permanentemente la morfología de la costa y las corrientes litorales, por lo que se debe considerar el impacto potencial a ambos lados de la estructura -En caso de presentarse erosión diferencial de la costa, se recomiendan prácticas de trasvase de sedimento
<b>Rompeolas (separado)</b>	# 20: Playas rectas y bien definidas con posible presencia de dunas, donde el proceso dominante es el oleaje, (ej. Puerto Morelos, Q.R.)	-Atenuación de la energía del oleaje -Disminución a la velocidad de la corriente litoral -Presencia de refracción -Disminución del transporte longitudinal y/o transversal	-Acreción en las playas -Depositación en tómbolo -Erosión corriente abajo -Falla de estructura por erosión al pie de la estructura	-Utilizado en casos donde los procesos de transporte litoral son dominantes y resultan en erosión de la costa -Utilizado en casos donde el oleaje es altamente energético -Se recomienda el uso del diseño sumergido para mitigar el impacto visual -Se recomienda el uso de estructuras que permitan la colonización de especies endémicas -Se recomienda construir en profundidades poco profundas, sin alterar arrecifes
<b>Muelle piloteado</b>	#22: Playa recta, dominada por oleaje y con presencia de arrecifes en la parte marina (ej. Cozumel, Q.R.)	-Difracción de corriente litoral -Efecto de sombra hidrodinámica del transporte litoral corriente abajo -Reducción de luz bajo la estructura	-Posible erosión corriente abajo -Disminución de cobertura vegetal bajo estructura	-El impacto de un muelle piloteado en playas, aunque menor que una estructura con base sólida, es provocar o incentivar la erosión corriente abajo (como en caso de Progreso, Yuc.) debido a la alteración de los patrones de circulación -No se debe construir en playas que ya presentan problemas de erosión -Se recomienda ubicar su construcción al final de la celda litoral para que actúe como espigón terminal -Dado que sí existe un traspase de transporte litoral por debajo de la estructura, ciertas acciones de mitigación pueden ser suficientes para evitar la erosión corriente abajo. La más eficiente de éstas es ubicar las construcciones corriente abajo detrás de la línea de dunas frontales, para permitir que tras la construcción del muelle, la playa tenga la capacidad de adaptarse a su nuevo estado (amortiguamiento



				y almacenamiento de arena). También se puede realizar trasvase de arena de un lado del muelle a otro, aunque esta opción es cara
<b>Muelle piloteado</b>	#27: Estuario, donde el proceso dominante es el oleaje, con humedales, pastos marinos y macroalgas (ej. Estero Punta Banda, B.C.)	-Reducción de luz bajo estructura -Alteración de corrientes y flujo de marea -Alteración de patrones de transporte de sedimento	-Disminución o destrucción de cobertura vegetal -Posible erosión y acreción	-En general los posibles impactos de los muelles piloteados en ambiente lagunares y de humedales están restringidos a la zona inmediata a la estructura (Vasilas <i>et al.</i> , 2011) -Los impactos son proporcionales al ancho (no alto) de la estructura, por lo que no se recomiendan estructuras de gran tamaño en sistemas lagunares frágiles (Vasilas <i>et al.</i> , 2011) -Se recomienda dar prioridad a la construcción con madera -Previo un análisis detallado para cada caso (evaluación de resiliencia), no se considera que deban tomarse precauciones especiales, puesto que al estar piloteada la estructura reduce su impacto de gran manera -El mayor impacto asociado con este tipo de estructuras se dará por parte de las actividades de navegación (ver abajo)
<b>Puerto</b>	# 20: Playa recta y bien definida, dominada por oleaje y con presencia de dunas (ej. Veracruz, Ver.)	-Cambio de la fisiografía de la línea de costa por construcción de estructuras, dragado de dársena y canales de navegación -Incremento de profundidad por dragado -Relleno o nivelación de dunas para instalaciones operativas	-Alteración de patrones de corrientes y transporte de sedimentos -Incremento erosión corriente abajo -Erosión de dunas y playas adyacentes a dunas -Destrucción de hábitats bentónicos, marinos y terrestres (costeros) -Incremento de contaminación (por sólidos durante construcción y químicos durante operación)	-En caso de desarrollos portuarios nuevos se recomienda aprovechar la morfología natural de la costa y elegir un área naturalmente protegida y profunda (evitar problemas de azolve que conviertan al puerto en elefante blanco como en Puerto Chiapas) -La selección de la ubicación se debe hacer con base en sus características hidrodinámicas y ecológicas, así como de uso de suelo de tierras adyacentes -No se debe implementar este tipo de desarrollo en una playa que ya presente problemas graves de erosión -Siempre es necesario hacer un análisis de sitios alternativos -Asegurarse de que el sitio tiene suficiente espacio para el desarrollo y su futuro crecimiento -En particular se debe considerar la tasa de transporte litoral, cuyo bloqueo puede tener consecuencias corriente abajo y la magnitud y dirección predominante del oleaje (para diseño) de tipo y orientación de estructuras necesarias -Se debe hacer un estudio de la vulnerabilidad de los ecosistemas involucrados y su resiliencia -En caso de realizarse en zonas de importancia ecológica prioritaria, como zonas de manglar, sitios de anidación, etc. se deberán adoptar medidas de mitigación como reconstrucción de hábitats y de ser posible, considerar la opción

				menos invasiva de estos ambientes
<b>Marina</b>	#3: Playa arenosa, con presencia de dunas y donde el proceso dominante es la marea (ej. Puerto Peñasco, Son.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cambio de la fisiografía de la línea de costa por construcción de estructuras, dragado de dársena y canales de navegación</li> <li>-Incremento de profundidad por dragado</li> <li>-Relleno o nivelación de dunas para instalaciones operativas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alteración de patrones de corrientes y transporte de sedimentos</li> <li>-Incremento erosión corriente abajo</li> <li>-Erosión de dunas y playas adyacentes a dunas</li> <li>-Destrucción de hábitats bentónicos, marinos y terrestres (costeros)</li> <li>-Incremento de contaminación (por sólidos durante construcción y químicos durante operación)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Por sus dimensiones, las marinas tienen menor impacto que un puerto, aunque se deben seguir las mismas regulaciones que las planteadas en el punto anterior para la elección de su ubicación</li> <li>-Puerto Peñasco es un ejemplo donde se escogió un puerto natural en términos geomorfológicos, por su nivel de protección, además de que al estar las estructuras al nivel de la línea de costa (no salientes), no se ha generado erosión corriente abajo</li> <li>-No se debe implementar este tipo de desarrollo en una playa que ya presente problemas graves de erosión</li> <li>-Se debe hacer un estudio de la vulnerabilidad de los ecosistemas involucrados y su resiliencia</li> <li>-En caso de realizarse en zonas de importancia ecológica prioritaria, como dunas, sitios de anidación, etc. se deberán adoptar medidas de mitigación como reconstrucción de hábitats</li> </ul>
<b>Marina</b>	#7, 8: Sistema laguna-isla de barrera, con presencia de dunas, manglares y humedales. Régimen energético mixto con dominancia de marea (ej. La Paz, B.C.S.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cambios en los patrones de corrientes y transporte de sedimento</li> <li>-Incremento en el nivel de oleaje por embarcaciones</li> <li>-Incremento turbidez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Destrucción de hábitat</li> <li>-Erosión del fondo y de los bancos por oleaje artificial</li> <li>-Contaminación química y de ruido por embarcaciones</li> <li>-Afectación a flora y fauna bentónica por incremento turbidez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se recomienda utilizar el diseño menos invasivo, como peines flotantes en lugar de muelles y no construir muros para estabilizar los los bancos o proteger las zonas operaciones</li> <li>-Ni los peines ni la parte marina podrán estar ubicados sobre manglares o dunas</li> <li>-Se recomienda limitar el tamaño, velocidad y cantidad de las embarcaciones cuando el lugar está próximo a sitios de anidación o cuando se pueden generar problemas de erosión y turbidez</li> </ul>
<b>Muro</b>	#5: Playa arenosa, con presencia de dunas, sujeta a energía mixta, donde el proceso dominante es la marea (ej. La Paz, B.C.S.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nivelación de la playa y dunas</li> <li>-Menor disipación y mayor reflexión del oleaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Erosión de sedimento al pie de la estructura</li> <li>-Socavación del muro</li> <li>-Rompimiento del oleaje más cerca de la costa</li> <li>-Erosión a ambos lados de la</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Los muros son estructuras que casi siempre se construyen como respuesta a problemas graves de erosión, es decir cuando ya no hay otra opción para proteger la infraestructura y el oleaje está rompiendo sobre ésta</li> <li>-No se recomienda a menos que sea un caso de infraestructura de gran valor</li> <li>-Por su naturaleza reflectiva, empeoran el problema de erosión tanto frente a la estructura como corriente abajo</li> </ul>

			estructura -Destrucción de hábitats	-Siempre se debe priorizar la conservación de las dunas sobre la construcción de un muro
<b>Carretera/Puente</b>	#8: Estuario o laguna, con energía mixta y dominancia de la marea, presencia de manglares, pastos marinos y humedales (ej. Guaymas, Son.)	-Cambio del prisma mareas (cuando no es piloteado) -Cambios a los patrones de corrientes, transporte de sedimento, flujo y reflujos de marea	-Los cambios en el prisma de marea pueden provocar un desbalance en la anchura, profundidad y cantidad de bocas de la laguna -Posibles problemas de erosión o azolve de la laguna o bocas -Eutroficación de la zona aislada	-Sólo se debe permitir la construcción de carreteras y puentes sobre lagunas costeras, estuarios y humedales si el estudio de impacto ambiental lo recomienda y cuando sea de interés prioritario nacional -Se recomienda hacer estudios de modelación hidrodinámica para prever el comportamiento del sistema -Sólo podrán ser piloteados para evitar cambiar los patrones de flujo y reflujos y de transporte sedimentario, los cuales, a su vez, pueden afectar la calidad del agua y causar problemas de erosión o azolve en la laguna y sus bocas, así como provocar la desecación de humedales -Se deberán tomar acciones de mitigación para compensar el daño a la fauna y flora bentónica ubicada en el lugar de la carretera o puente
<b>Edificación (permanente, ej. hotel)</b>	#11, 13: Playa recta y bien definida, con energía mixta, dominancia del oleaje y posible presencia de dunas y arrecife (ej. Cabo Pulmo, B.C.S.)	-Nivelación de playa y dunas -Desplazamiento y migración de dunas -Cambio o bloqueo de patrones de viento -Destrucción de la cobertura vegetal por tránsito peatonal y de vehículos	-Pérdida de la capacidad del sistema de amortiguamiento y almacenamiento de arena -Aceleración del proceso erosivo de la playa -Aceleración del proceso erosivo o migratorio de la duna	-Evitar modificar la línea de costa, fisiografía y morfología de la duna costera -Se debe construir detrás de la línea de dunas primarias, que actúan como sistema de amortiguamiento y almacenamiento de arena, además de servir de barrera natural ante inundaciones (protegiendo la edificación) -En dunas secundarias que se ubiquen en sitios expuestos y tengan material no consolidado, tampoco se permiten construcciones permanentes -Mantener la cobertura vegetal nativa, a menos que se cuente con autorización de la autoridad competente para el cambio de uso de suelo en terrenos forestales -Evitar la obstrucción o alteración del transporte y la dinámica natural de la arena -Evitar alteraciones en zonas de anidación o agregación de aves migratorias o residentes, así como de otras especies enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT -En casos donde no existe desarrollo en la zona, el ambiente de arrecife debe ser prioritario en términos de conservación, por lo que se deberá limitar el desarrollo cercano a éste
<b>Edificación (temporal, ej. andadores, palapas)</b>	#20: Playa recta y bien definida, dominada por oleaje y con presencia de dunas (ej.	-Nivelación de playa y dunas -Desplazamiento y migración de dunas	-Pérdida de la capacidad del sistema de amortiguamiento y almacenamiento	-Solamente los andadores para crear accesos a la playa, temporales y piloteados se permiten sobre el sistema de dunas frontal o primario -Cualquier otra construcción o actividad, incluyendo palapas y todo tipo de tránsito se

	Veracruz, Ver.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cambio o bloqueo de patrones de viento</li> <li>-Destrucción de la cobertura vegetal por tránsito peatonal y de vehículos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>de arena</li> <li>-Aceleración del proceso erosivo de la playa</li> <li>-Aceleración del proceso erosivo o migratorio de la duna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>debe realizar detrás de la línea de dunas primarias, que actúan como sistema de amortiguamiento y almacenamiento de arena, además de servir de barrera natural ante inundaciones</li> <li>-En dunas secundarias que se ubiquen en sitios expuestos y tengan material consolidado, las construcciones solo podrán ser temporales (mismos criterios que dunas primarias)</li> <li>-Evitar modificar la línea de costa, fisiografía y morfología de la duna costera</li> <li>-Mantener la cobertura vegetal nativa, a menos que se cuente con autorización de la autoridad competente para el cambio de uso de suelo en terrenos forestales</li> <li>-Evitar la obstrucción o alteración del transporte y la dinámica natural de la arena</li> </ul>
<b>Plantas termoelectricas</b>	#20: Playas rectas y bien definidas con posible presencia de dunas, donde el proceso dominante es el oleaje (ej.: Rosarito, B.C.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cambios en la fisiografía de la línea de costa por estructuras de protección, canales y tuberías de toma y desagüe</li> <li>-Nivelación de playas y dunas</li> <li>-Incremento de temperatura del agua circundante por descargas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Posible erosión corriente abajo</li> <li>-Destrucción de hábitats</li> <li>-Erosión de dunas y playas adyacentes a dunas</li> <li>-Muerte o migración poblaciones de flora y fauna por choque térmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La infraestructura requerida para la operación de una planta termoelectrica incluye obras de toma y descarga de agua, además de estructuras de protección costera, las cuales frecuentemente generan problemas de erosión por interrupción del transporte litoral o por socavación, en el caso de las tuberías</li> <li>-La descarga de agua caliente directamente al mar tiene graves efectos en la ecología de la zona, tales como la destrucción de poblaciones animales y vegetales locales (blanqueamiento de corales, por ejemplo)</li> <li>-Se recomienda elegir una zona en donde la dispersión de la pluma térmica sea rápida, es decir donde haya energía elevada</li> <li>-Una actividad de mitigación es diluir el agua caliente con agua de mar antes de tirarla al mar</li> </ul>
<b>Tuberías</b>	# 2, 4: Estuario, domina marea y con posible presencia de humedales (ej. San Felipe, B.C.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Erosión de bancos cerca de desembocadura</li> <li>-Cuando expuestas, afectación a corrientes y patrones de flujo y reflujo</li> <li>-Captación accidental de fauna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Destrucción de hábitat</li> <li>-Daño a flora y fauna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El diseño es importante para el adecuado funcionamiento y reducción del impacto de estas estructuras, algunas recomendaciones son (SEPA, 2008):</li> <li>-escoger el lugar adecuado, es decir, una zona de costa recta, estable, sin señas de erosión o depositación</li> <li>-se deben evitar ubicarlas cerca de hábitats de importancia, como arrecifes, pastos marinos y bocas</li> <li>-el diseño más pegado al suelo o fondo es mejor en términos de impacto, pero puede no ser eficiente</li> <li>-en casos de grandes rangos de marea se recomienda que la tubería vaya enterrada hasta el límite inferior de marea</li> </ul>

				Otras estrategias de mitigación utilizadas para contrarrestar dichos impactos incluyen la colocación de mallas para evitar que peces sean captados por la tubería, y la colocación de 'collares' alrededor de la boca de la tubería para evitar erosión.
<b>Tubería</b>	# 28, 19: Acantilado sedimentario con posible presencia de macroalgas en la zona marina, domina oleaje (ej. El Sauzal, B.C.)	-Descarga directamente sobre acantilado	-Erosión de acantilado	-No se recomienda colocar tubos de desagüe en las partes altas de los acantilados sedimentarios pues contribuyen a la erosión de estos -De ser necesaria su colocación se deberán acompañar de una estructura que canalice el agua hasta el mar, sin embargo dada la naturaleza erosiva de los acantilados sedimentarios la vida útil de esta estructura puede ser limitada -En la salida al mar se debe cuidar el tipo de descarga para no afectar las comunidades bentónicas flora y fauna -De ser posible la descarga se debe realizar después de la profundidad de cierre
<b>Granja acuícola (estanque)</b>	# 17: Laguna costera, con presencia de islas de barrera, dunas, manglares y humedales, donde la energía es mixta y el proceso dominante es el oleaje (ej. Sistema San Ignacio, Navachiste, Macapule, Sin.)	-Destrucción de manglares y humedales por construcción -Descarga de efluentes -Disposición de sedimentos -Estanques abandonados	-Pérdida de hábitat y áreas de crianza -Erosión costera -Alteración del flujo y patrones de drenaje por construcción de estanques (diminución prisma mareal) y bloque de flujo por canales y tuberías -Contaminación en aguas receptoras -Azolve de la laguna por descarga de sólidos	-La importancia económica de esta actividad hace importante enfocar los esfuerzos en la adecuada regulación y no en la prohibición, para evitar los impactos y consecuencias a largo plazo -La ubicación y diseño debe considerar áreas adecuadas, de acuerdo a su topografía, régimen de mareas, tiempo de residencia del agua y volumen del cuerpo de agua -Se deben incluir siempre áreas de amortiguamiento -Se debe cuidar la densidad y el espaciamiento entre granjas -Para evitar la contaminación por descargas y sedimentos se pueden utilizar estanques de sedimentación-oxidación, mejoramiento del suministro y composición del alimento y diversificar cultivos -Utilizar el sedimento limpio para reconstrucción de hábitats y no descargarlo directamente pues contribuye al azolve -Las instalaciones (incluyendo estanques, canales y tuberías) no deben ubicarse en zona de dunas. Las tuberías de desagüe solo se permitirán en zona de dunas si están enterradas
<b>Granja acuícola (encierro)</b>	# 23, 28: Playa o acantilado con presencia de macroalgas, donde el proceso dominante es el	-Incremento en la concentración de sólidos suspendidos -Incremento en la	-Contaminación, eutroficación -Cambio en la distribución de especies	-En algunos países de Europa se ha implementado el cultivo migratorio para evitar afectar un área de manera irremediable, también se realiza rotación de las especies cultivadas -Otra medida para mitigar la contaminación

	oleaje (ej. Ensenada, B.C.)	navegación -Atracción de depredadores	-Peligro para especies depredadoras	orgánica por heces y desechos de comida es la utilización de estanques cerrados cuyos desechos son limpiados y depositados en áreas específicas periódicamente
<b>Desalinizadora</b>	#10: Acantilado rocoso, con presencia de comunidades de macroalgas, energía mixta y dominancia de la marea (ej. Loreto, B.C.S.)	-Incremento de salinidad por descarga de salmuera directamente al mar -Estratificación del agua (por diferencia de densidad) en la zona de descarga -Captación accidental de fauna	-Muerte de flora y fauna por “choque osmótico” -Daño a fauna por captación accidental	-Un simple tratamiento con dilución previa debe ser reglamentario. -Se recomienda prestar atención a la localización y profundidad de los captadores de agua y de los emisores de las salmueras (entre más profundo, mejor). -Igualmente necesario es conocer el régimen de mareas, corrientes, vientos, oleaje y todos los factores hidrodinámicos que puedan asegurar la rápida dispersión de la pluma de salmuera. -Si las tuberías de captación y desagüe están expuestas pueden actuar como espigones, incentivando erosión
<b>Dragado</b>	# 17: Laguna costera, con presencia de islas de barrera, manglares y humedales, donde la energía es mixta y el proceso dominante es el oleaje (ej. Navachiste, Sin.)	-Cambio en el prisma de marea (por incremento de profundidad) -Destrucción de cohesión de capa superficial de sedimento -Incremento temporal de turbidez -Incremento de velocidad de corrientes y oleaje dentro de laguna (debido a mayor profundidad)	-Destrucción de hábitat -Desaparición de fauna y flora bentónica -Posible aceleración de procesos erosivos -Incremento de capacidad de transporte de sedimento y por tanto de la posible pérdida de sedimento de la laguna o depositación en partes no deseadas	Si el dragado es necesario para fines de navegación y es autorizado por las instancias competentes se deben de observar los siguientes criterios: -El material procedente de dragado sólo se verterá si no existe posibilidad de aprovecharlo, y si se cuenta con la autorización correspondiente -Para mitigar el cambio a la hidrodinámica de la laguna por incremento de la profundidad se deberá, en lo posible, reutilizar el material para creación y regeneración de hábitats, como islotes artificiales para manglar -Los dragados son incompatibles en áreas de distribución de pastos marinos, junto con áreas de distribución de comunidades de manglares Para el vertido del material de dragado en el mar, la profundidad requerida estará en función de la granulometría y de la dispersión que se pueda aceptar en la zona: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se deberá tener presente que si el material procede de dragados mecánicos, la dispersión es menor porque el material es más denso y cohesivo, en cambio, las dragas de succión transportan material con alto contenido en agua que hace aumentar su dispersión al ser vertido</li> <li>• El vertido por tubería tiende a crear grandes zonas de material en suspensión debido a que la fracción más gruesa se separa rápidamente de la fracción fina</li> <li>• El material con alto contenido en finos (mayor al 20%), se verterá en zonas que aseguren su inmovilización gracias a la</li> </ul>

				<p>topografía y a la baja energía del mar. Se recomienda verter a profundidades cercanas a los 40 m, y dependiendo de la energía del mar, se podrá confinar o recubrir</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si el contenido de finos del material dragado es inferior al 15-20%, se recomienda aprovecharse en alimentación de playas o rellenos de muelles</li> <li>• Si el material dragado está contaminado, es necesario aislarlo, almacenándolo y atender las disposiciones normativas y reglamentarias específicas para ello. No se pueden verter al mar</li> <li>• En áreas donde se distribuyan arrecifes, pastos marinos, manglares, humedales no podrá verterse el material procedente de dragas de succión o por medio de tuberías</li> </ul>
<b>Dragado</b>	<p>#21, 23, 25: Banco de arena sumergido frente a playa o isla de barrera.</p> <p>Dominancia del oleaje y presencia de pastos marinos y macroalgas (ej. Cozumel, Q.R.)</p>	<p>-Eliminación de capa superficial de sedimento, incluyendo su flora y fauna</p> <p>-Incremento de la profundidad en la zona</p> <p>-Incremento temporal en la turbidez</p>	<p>-Destrucción de hábitat</p> <p>-Desaparición de fauna y flora bentónica</p> <p>-Alteración en los patrones de las corrientes costeras y oleaje (cuando el banco es somero y cercano a la costa)</p>	<p>Si el dragado es necesario para fines de navegación o como material para recarga de playas o construcción y es autorizado por las instancias competentes se deben de observar los siguientes criterios:</p> <p>-En los casos de dragado para navegación, se deben buscar usos productivos que permitan rentabilizar el material dragado limpio, como en obras públicas (mejora de terrenos, rellenos, sustituciones y recubrimientos), regeneración y creación de playas, construcción de bermas sumergidas, construcción de diques y presas de tierra, como materiales de construcción, usos en agricultura y pesca (creación y mejora de tierra vegetal, acuicultura, mejora de recursos pesqueros)</p> <p>-En todo caso, los dragados son incompatibles en áreas de distribución de pastos marinos junto con áreas de distribución de comunidades de manglares</p> <p>-Para el vertido del material de dragado en el mar, se deben seguir los mismo criterios que en el caso anterior</p>
<b>Minado</b>	<p>#11, 12: Playa recta y bien definida, con presencia de dunas o manglar, sujeta a un régimen de energía mixta con dominancia de oleaje (ej. Tapachula, Chis.)</p>	<p>-Cambios al perfil de playa</p> <p>-Cambios a los patrones de rompimiento del oleaje (por cambio en pendiente)</p> <p>-En caso de realizarse en dunas se provoca</p>	<p>-Incremento de erosión local y corriente abajo</p> <p>-Incremento de erosión de dunas</p> <p>-Sistemas de dunas estabilizados se pueden convertir en móviles por la eliminación de</p>	<p>-En caso de autorizarse bancos de materiales de arena y minerales y sustancias no reservadas a la Federación, la extracción solamente se podrá realizar en la zona de playa (nunca de dunas) y si el balance sedimentario de la celda litoral es positivo</p> <p>-La aprobación debe estar sujeta los estudios de impacto ambiental y económicos (para ver si realmente es redituable para el costo ambiental) y debe estar sujeta a la implementación de medidas de mitigación como reconstrucción de</p>

		nivelación de dunas y eliminación de cobertura vegetal	vegetación y dunas frontales -Incremento del riesgo de inundación de la zona costera adyacente -Eliminación de potencial turístico	hábitats en otra parte -El volumen de extracción siempre deberá ser menor a la tasa de acreción de la playa que se está minando -Se deberá demostrar que la erosión corriente abajo resultante de la pérdida de material para la corriente litoral no afectará de forma significativa el sistema de dunas o algún otro ecosistema de importancia localizado corriente abajo -No se podrá realizar este tipo de extracción o minado de playas ubicadas a lo largo islas de barrera o cuando el transporte litoral alimenta una isla de barrera, pues se puede afectar a todo un sistema lagunar
<b>Relleno</b>	#20, 24: Playa o isla de barrera, con presencia de dunas y dominancia del oleaje (ej. Cancún, Q.R.)	-Cambios al perfil de playa -Cambios a la composición granulométrica original	-Cambios temporales en los patrones de rompiente del oleaje por cambio del perfil (hasta que éste encuentra de nuevo su equilibrio)	-Las factores que provocan erosión de la costa no cambian después de realizar un relleno, por lo que ésta es solamente una solución de carácter temporal, que cuando está bien realizada es altamente recomendable por su bajo impacto comparado con estructuras de protección -Su éxito depende de la cuantificación adecuada de la cantidad de material necesario y del tipo de material utilizado, el cual debe ser tan parecido al original como sea posible, tanto por cuestiones estéticas, como de equilibrio de procesos -Su impacto está casi completamente relacionado al dragado, por lo que se recomienda ver este apartado para más detalles
<b>Navegación</b>	#17, 18: Estuario o laguna costera, con presencia de manglar, pastos marinos y macroalgas. Sujeto a régimen de energía mixto con dominancia de oleaje (ej. Laguna Superior, Oax.)	-Incremento de oleaje "artificial" -Contaminación química y auditiva	-Posible incremento de erosión por resuspensión de sedimento por oleaje -Destrucción de hábitat -Daño a flora y fauna	-La impactos de la navegación se magnifican en cuencas cerradas protegidas como estuarios y lagunas costeras, dada su profundidad limitada, y los ecosistemas frágiles que generalmente se encuentran en estos ambientes -Se debe evitar la navegación de embarcaciones de motor o gran tamaño cerca de sitios de anidación, y zonas de manglar -Se deben establecer límites precisos de la velocidad permitida, principalmente en zonas frágiles y donde ya existan problemas de erosión

La costa mexicana, en particular el Caribe y el Pacífico Central, ha sido objeto de un gran desarrollo turístico, residencial e industrial durante los últimos 50 años. Durante este tiempo se han construido innumerables estructuras con diseños inapropiados y con graves impactos en la dinámica costera. Gran parte de la problemática ha sido derivada de la falta de criterios de regulación específicos, que permitan parar o mejorar aquellos desarrollos mal planeados. En respuesta a esto, en este documento se propone una serie de criterios



de regulación de obras y actividades por tipo de ambiente, en materia de dinámica costera (corrientes, oleaje, transporte de sedimentos). Se han escogido, sobre todo, ejemplos de ambientes donde el proceso dominante es el oleaje, pues son los más abundantes en nuestras costas (ver sección de clasificación).

Es importante puntualizar que la lista de actividades y obras discutidas son tanto aquellas que son recomendadas, como las que no lo son, y en ambos casos se explica el fundamento técnico aplicable. Asimismo, se asume que estas regulaciones son de carácter general y que para cada obra se realizará como mínimo un análisis preliminar de los procesos costeros locales, incluyendo la evaluación de las tendencias en la posición de la costa, el presupuesto sedimentario y las condiciones hidrodinámicas (CERC, 2000; Silva Casarín y Mendoza Baldwin, en prensa), así como los estudios de impacto ambiental requeridos por las autoridades competentes.

La información presentada en la matriz de la Tabla 3.2 puede ser utilizada como base para un análisis más a detalle para cada ambiente, como se ha realizado para el ecosistema de dunas en el documento *Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras. Criterios y Recomendaciones*, elaborado por la SEMARNAT, (Pedroza *et al.*, 2013). Adicionalmente, las recomendaciones dadas se pueden refinar a través de la consideración de condiciones hidrodinámicas más específicas, tales como la presencia de condiciones de calma o de tormenta, energía alta o baja, entre otras, lo cual hace de este sistema, uno versátil y que se puede ir mejorando con el tiempo. En este caso, todas las recomendaciones se han hecho para condiciones reinantes (las que ocurren la mayor parte del tiempo). También se pueden incluir consideraciones más específicas para cada actividad y obra dependiendo de sus características y se puede incluir el nivel de desarrollo de la zona.

En donde se ha considerado necesario, las recomendaciones presentadas hacen la distinción entre zonas sin desarrollo y zonas donde ya existe infraestructura importante, de tal forma que en los casos en donde la infraestructura importante ya existe se provee una alternativa diferente a la aplicable para zonas de bajo nivel de presión antrópica. En el contexto de este documento, se entiende por *infraestructura importante* al conjunto de construcciones y desarrollos de *interés público* ubicados en la parte terrestre de la zona costera, donde *interés público* se define con base en los servicios económicos y sociales que esta infraestructura da a la comunidad. Cabe resaltar que las recomendaciones dadas para el caso de sistemas bajo gran presión antrópica son generales y que aunque deben ser tomadas en cuenta como fundamento técnico, la decisión ulterior de proteger o desarrollar un área determinada, debe ser producto de un análisis particular para cada caso que incluya, como lo marca la ley, un estudio de impacto ambiental y una consulta pública que considere los intereses de la población y autoridades locales.

## 4. Descripción de información y análisis requeridos a nivel local

En esta sección se plantea analizar dos zonas que a la fecha han presentado desarrollos antagónicos. Bahía Banderas localizada en el Pacífico Mexicano, donde el desarrollo se centra en la explotación de los recursos naturales para el crecimiento del sector turístico; y Holbox una isla localizada en el Caribe mexicano dentro del área natural protegida *Yum-Balam*, que mediante la protección del ambiente, busca un desarrollo en el turismo interesado en su aspecto ecológico (Figura 4.1).

Como primera fase se elaboró una base de datos que contiene variables con información geomorfológica, oceanográfica y ecológica que permitió:

- a. Caracterizar la zona a escala de unidad de manejo y
- b. Evaluar la vulnerabilidad físico-ambiental de la costa en ambas ubicaciones

Adicionalmente, en este capítulo se ha supuesto que el riesgo por inundación costera y sus impactos son diferentes en cada zona, de tal forma que se puede relacionar el grado de vulnerabilidad estimado con las diversas variables geomorfológicas, oceanográficas y ecológicas obtenidas a partir de la caracterización de la costa y así poder identificar aquellas que son más determinantes en el nivel de impacto y por tanto prioritarias en la construcción de bases de datos que puedan ser utilizadas para el adecuado manejo de la costa.

El conocimiento detallado del grado de vulnerabilidad a la inundación costera de una localidad es útil para plantear opciones y estrategias de manejo, tales como: la protección de la línea de costa a través de defensas naturales y artificiales; la posibilidad de proteger solamente aquellas áreas densamente pobladas o con alto valor económico o ecológico; y, por último, el abandono del desarrollo de la actual línea de costa y retroceso tierra adentro. En la sección 4.5 se hace un análisis de éstas y otras opciones de manejo, utilizando como base la caracterización y evaluación de la vulnerabilidad a la inundación costera presentados en las secciones 4.2 y 4.3.

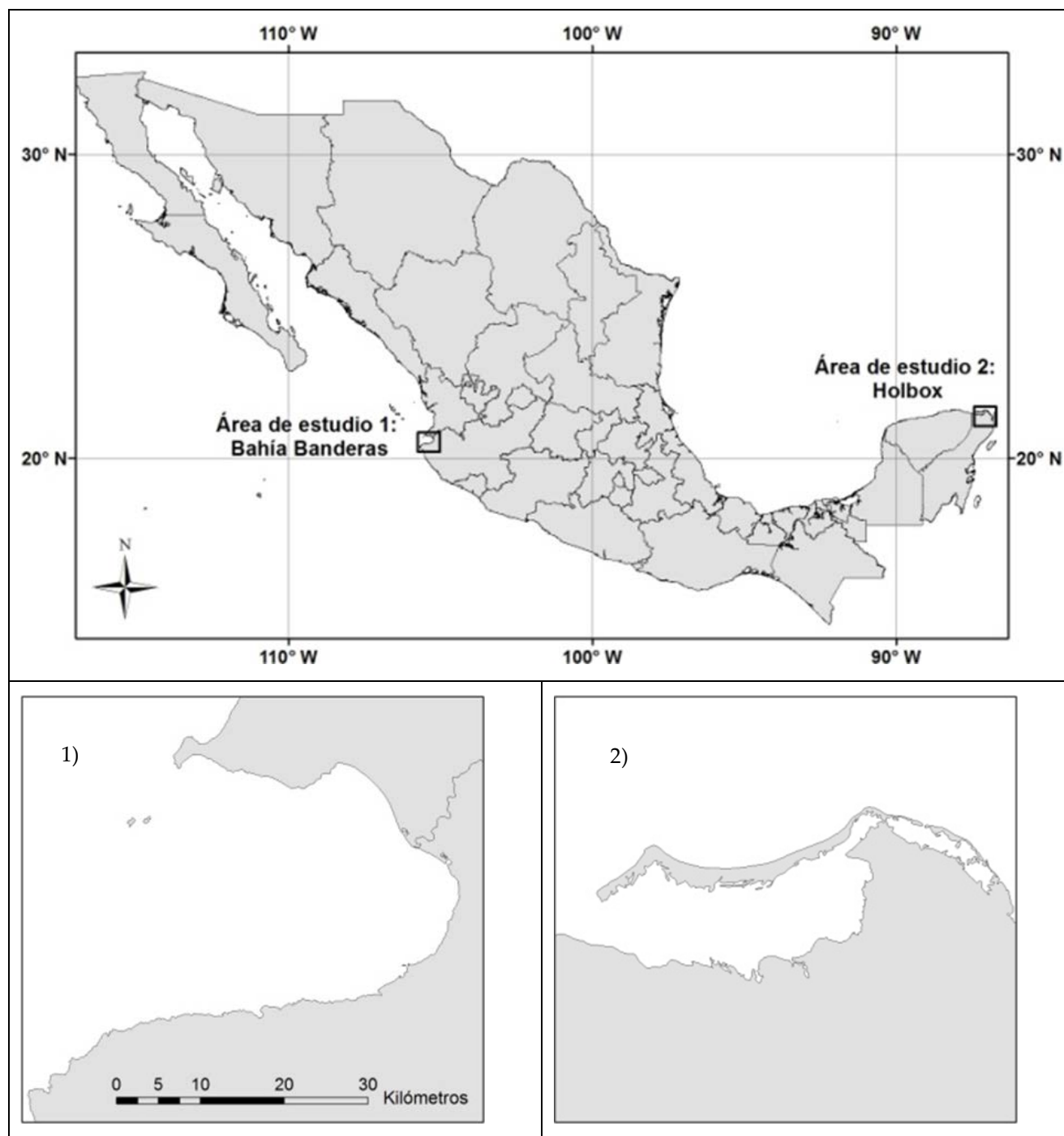
### 4.1. Objetivos

El objetivo principal de este capítulo es analizar si los lineamientos hasta ahora seguidos en ambos sitios de estudio son adecuados, según su vulnerabilidad, situación socio-económica, normatividad y planes de desarrollo, e identificar la información mínima requerida para hacer dicho análisis. Para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos particulares:

1. Caracterización y clasificación de las zonas de estudio
2. Identificar los peligros característicos de los dos sitios de estudio y plantear escenarios de análisis
3. Evaluar la vulnerabilidad física y socioeconómica de cada zona estudiada
4. Identificar parámetros imprescindibles en la creación de una base de datos costeros a nivel local

Esta bahía, con una extensión de casi 100 km, está ubicada en el litoral del Pacífico y abarca los municipios de Bahía de Banderas, Puerto Vallarta y Cabo Corrientes, pertenecientes a los estados de Nayarit y Jalisco. Presenta un clima semicálido subhúmedo fresco (Fonatur, 2002), con lluvias en verano, cuyo patrón

estacional juega un rol importante en el aporte sedimentario a las playas. La geomorfología de la región es típica de un valle de río inundado, con una planicie central, conformada principalmente por rocas sedimentarias y suelo, y dos macizos plutónicos de roca ígnea intrusiva y extrusiva delimitando la bahía. El ancho de la zona de influencia de los procesos costeros, está delimitado precisamente por estos elementos geomorfológicos, siendo de tan solo un par de kilómetros en las partes donde el pie de las sierras alcanza la línea de costa, y llegando 30 km tierra adentro, en la zona denominada delta del río Ameca (valle central).



**Figura 4.1 Localización de los sitios de estudio 1) Bahía Banderas y 2) Holbox**

## 4.2. Caracterización y clasificación costera a nivel local

### 4.2.1. Bahía Banderas

#### Caracterización física

El sedimento que se encuentra en la línea de costa está directamente relacionado con la geología observada en la zona, encontrándose arenas, provistas en su mayoría por el río Ameca, en la parte baja central; una mezcla de costa rocosa, arenas y cantos en la parte norte; y, finalmente, acantilados rocosos en la parte sur (ver Figura 4.2).

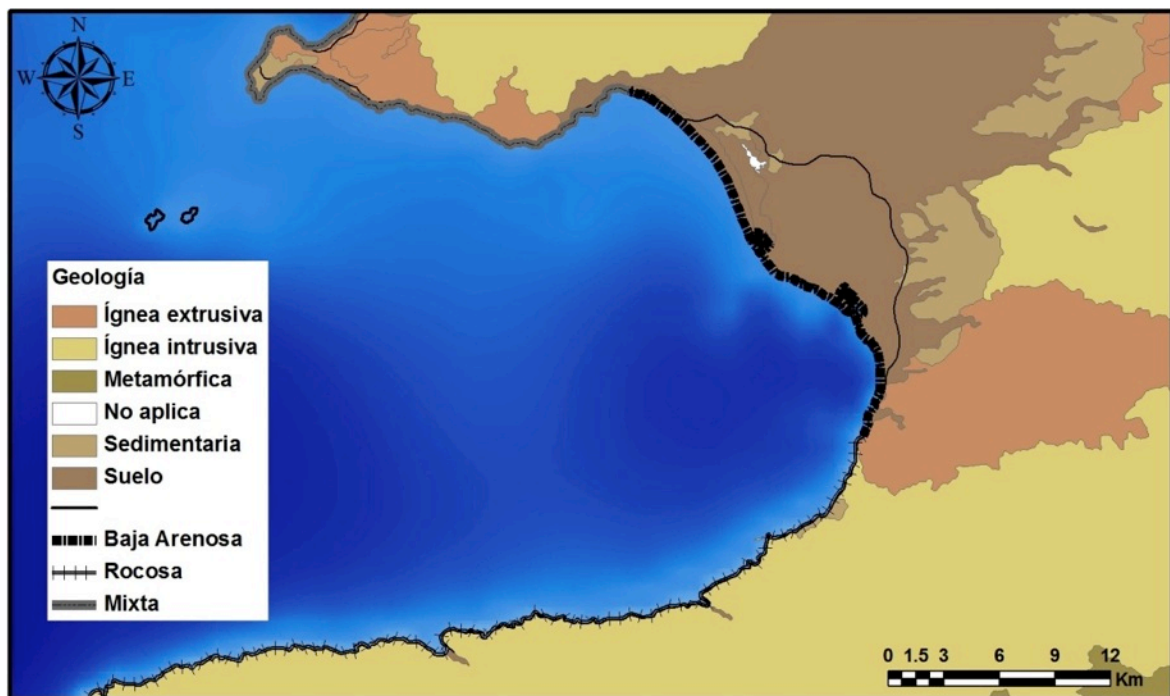
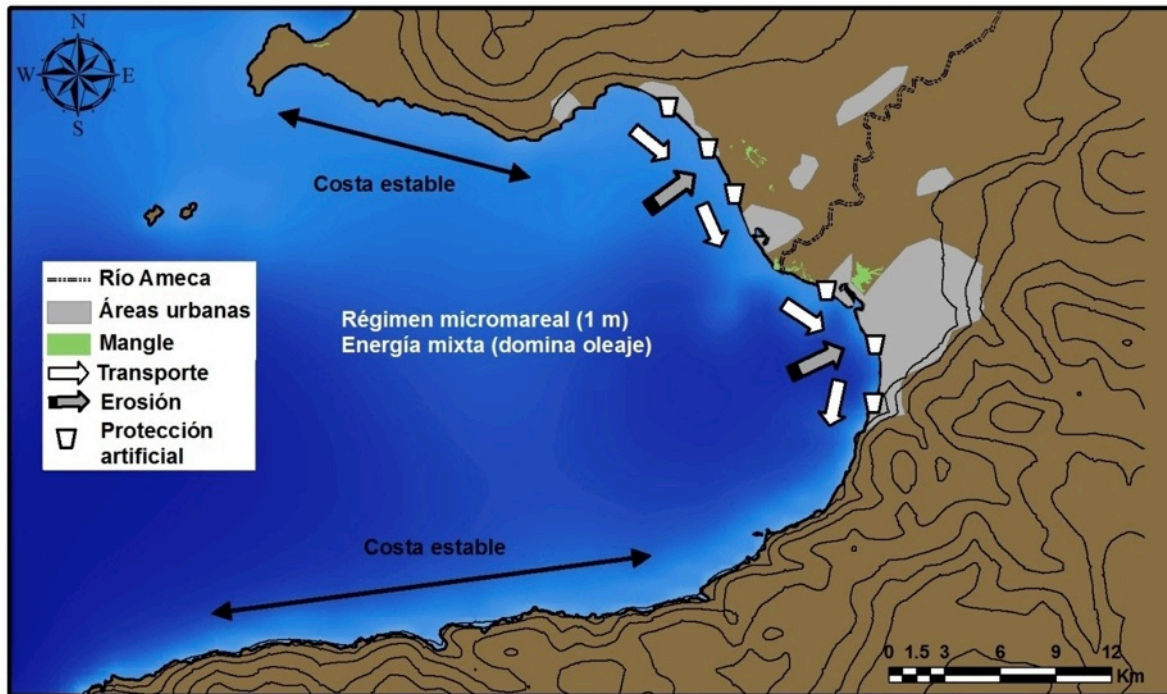


Figura 4.2 Caracterización geomorfológica de Bahía Banderas

En cuanto a sus características hidrodinámicas, la bahía presenta un régimen de marea mixto, con un promedio de amplitud de 1 m (micromareal). Los patrones de circulación litoral no están definidos; sin embargo, se ha observado que cuando los vientos dominantes son del suroeste, la circulación general es ciclónica, mientras que los vientos del noroeste inducen una circulación hacia el sur (Filonov *et al.*, 1995), a pesar de esto, los patrones de acumulación de sedimento en las playas indican que el transporte litoral predominante es en dirección anticiclónica. La disminución en el aporte sedimentario de los tres ríos que irrigan la bahía ha resultado en erosión de la costa, la cual ha sido afrontada por las autoridades y empresarios locales con espigones y en algunos casos, incluso protección directa de los desarrollos con rocas (Figura 4.3). Desafortunadamente, en la mayoría de los casos, los desarrollos se han construido extremadamente cerca de la línea de costa, impidiendo que elementos de protección natural, como dunas o

manglares, realicen esta función. En las partes menos desarrolladas, en el lado de Nayarit, existen todavía algunas zonas de manglar, reconocidas y protegidas, las cuales, sin duda brindarán protección a los desarrollos que se ubiquen detrás de estos ecosistemas en el futuro.



**Figura 4.3 Caracterización morfodinámica de Bahía Banderas**

#### Caracterización socioeconómica

Bahía de Banderas, está contenida dentro de los estados: Jalisco y Nayarit. En el estado de Jalisco, Bahía de Banderas comprende los municipios de Cabo Corrientes y Puerto Vallarta, mientras que la parte de Nayarit, comprende el municipio de Bahía Banderas.

El municipio de Bahía de Banderas (Nayarit), tiene una población total cercana a los 125 mil habitantes, contando con una superficie de 773 km<sup>2</sup>, su densidad de población es de 161 hab/km<sup>2</sup>, que se encuentra muy por encima de la media nacional y estatal. Su PIB per cápita es uno de los más altos que se presentan en el estado alcanzando 92 mil pesos, con una tasa de participación económica (TPE) cercana al 60%. Su economía se basa principalmente en la agricultura y el turismo, su crecimiento en los últimos años en materia de turismo, ha impulsado a el aumento económico de la industria de la construcción por las necesidades de nueva infraestructura para su uso. Presenta un índice de desarrollo social (IDS) alto, y de marginación (IM) bajo, sin embargo presenta una pobreza moderada de 33.1% y extrema de 4.4%; dentro del municipio existen localidades alejadas a la zona costera con bajo IDS y alto IM, estos datos sesgan los de pobreza.

Como se observa en la Figura 4.4, el valor agregado bruto del sector turismo es mayor al 40%, que habla de la importancia de este en su economía, a pesar de que las unidades económicas destinadas al turismo son el 15.7%.

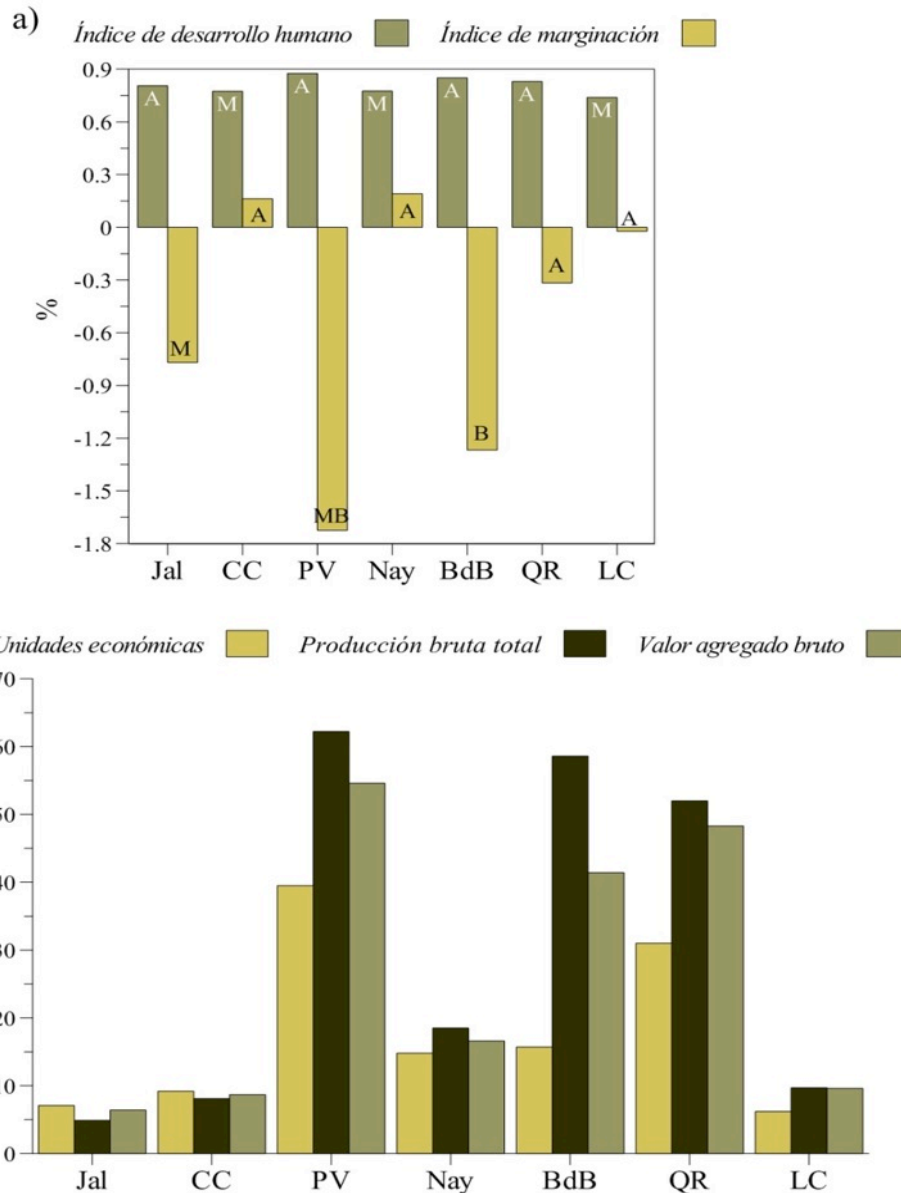


Figura 4.4 a) Índice de desarrollo humano e índice de marginación y b) Comparación del sector turismo estatal y municipal. Unidades económicas, producción bruta total y valor agregado bruto en porcentaje, donde Nac - nacional; Jal - Jalisco; CC - Cabo Corrientes; PV - Puerto Vallarta; Nay - Nayarit; BdB - Bahía de Banderas; QR - Quintana Roo; LC - Lázaro Cárdenas

Para el Estado de Jalisco se analizaron dos municipios, Puerto Vallarta (PV) y Cabo Corrientes (CC). CC es prácticamente el doble de superficie de PV, en conjunción con la gran población que sustenta PV la densidad de población para este municipio es muy alta (375 hab/km<sup>2</sup>), en el caso de CC es la más baja de la bahía (6.5 hab/km<sup>2</sup>). PV presenta un alto PIB per cápita alrededor de 106,000 pesos que es mayor al nacional y estatal, CC presenta el más bajo de la bahía con 52,500 pesos. La TPE de PV es de 62.5% y la de CC de 52 %. Su economía se basa principalmente en el turismo con un 54.6% de VAB, otras actividades económicas importantes son el cultivo de sandía y la ganadería de bovino.

La economía de CC depende principalmente de la agricultura y muy por debajo de esta de la ganadería. La participación del turismo en su economía es menor al 10%.

Como se ve en la Figura 4.4, el IDH es alto en PV y moderado en CC, así como el IM es muy bajo en PV y alto para CC. La pobreza es mayor en CC tanto en la moderada como en la extrema.

En cuanto al uso de suelo y ordenamiento ecológico y territorial existente, dentro de la bahía se localizan sitios RAMSAR, para el municipio de BdB el área suma 456,000 m<sup>2</sup> y en PV 1,154,000 m<sup>2</sup>, CC no presenta ningún tipo de área de protección ambiental.

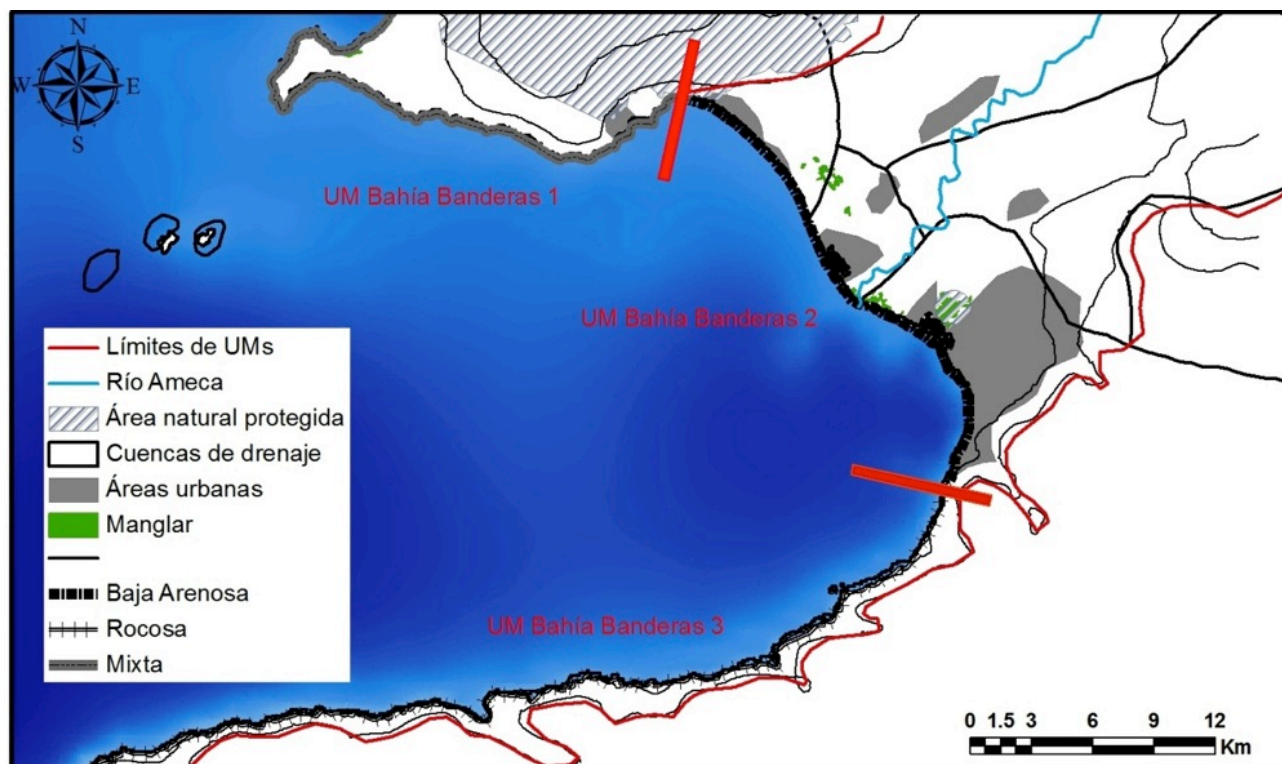


Figura 4.5 Delimitación de Unidades de Manejo en Bahía Banderas

#### Delimitación de Unidades de Manejo

La caracterización realizada permitió identificar tres áreas cuyos rasgos geológicos, geomorfológicos, socioeconómicos y ecológicos las diferencian claramente entre sí (ver Figura 4.5). Para ello se aplicó la metodología de delimitación de la zona costera a nivel de Unidad de Manejo, descrita en la sección 2.2.2. Esta metodología permite hacer un análisis de los límites terrestres de la zona costera con mayor detalle que los previamente establecidos por medio de elevaciones fijas. En el caso de la UM Bahía Banderas 1, se puede ver claramente que el límite terrestre se extiende más allá de la cota de los 200 m (límite utilizado para la delimitación a nivel nacional), ya que existe un área natural protegida cuyos alcances se extienden más allá de esta cota. De la misma forma, se consideraron las cuencas de drenaje, las zonas urbanas y las características geomorfológicas, entre otras, para definir las fronteras entre UM's y sus límites hacia tierra. En el caso de la UM Bahía Banderas 3, no existen factores físicos o socioeconómicos relevantes más allá de la

elevación, por lo que sus límites se establecieron con base en esa característica solamente. La variedad de características entre cada UM hace necesario evaluar la vulnerabilidad física de manera independiente para cada zona identificada, como se muestra más adelante.

#### 4.2.2. Holbox

##### Caracterización física

Holbox es una isla de barrera, formada por el transporte litoral (Figura 4.6), en la punta NE de la península de Yucatán, en el estado de Quintana Roo, en los límites entre el Golfo de México y el Mar Caribe. La serie de islotes y manglares que lo conforman tienen una longitud de aproximadamente 30 km, de los cuales sólo los últimos 5 km están habitados. La región presenta un clima subhúmedo cálido, con lluvias en todas las épocas, con máximos en verano y escasa oscilación de temperatura (García, 1988). Una de las características de la porción central y norte de la Península de Yucatán es que al no existir ríos superficiales a través de los cuales fluya el agua de las precipitaciones, el líquido se infiltra al subsuelo, disolviendo las rocas calizas que la conforman, dando origen a los cenotes y alimentando la costa solamente a través de afloramientos, lo que significa que no existe un aporte de sedimento terrígeno hacia la costa (Ruíz Martínez, 2009). Es por esto que el sedimento que se encuentra a lo largo de estas costas es mayoritariamente biogénico, es decir, resultado de la fragmentación de conchas, moluscos y corales que pueblan el litoral.

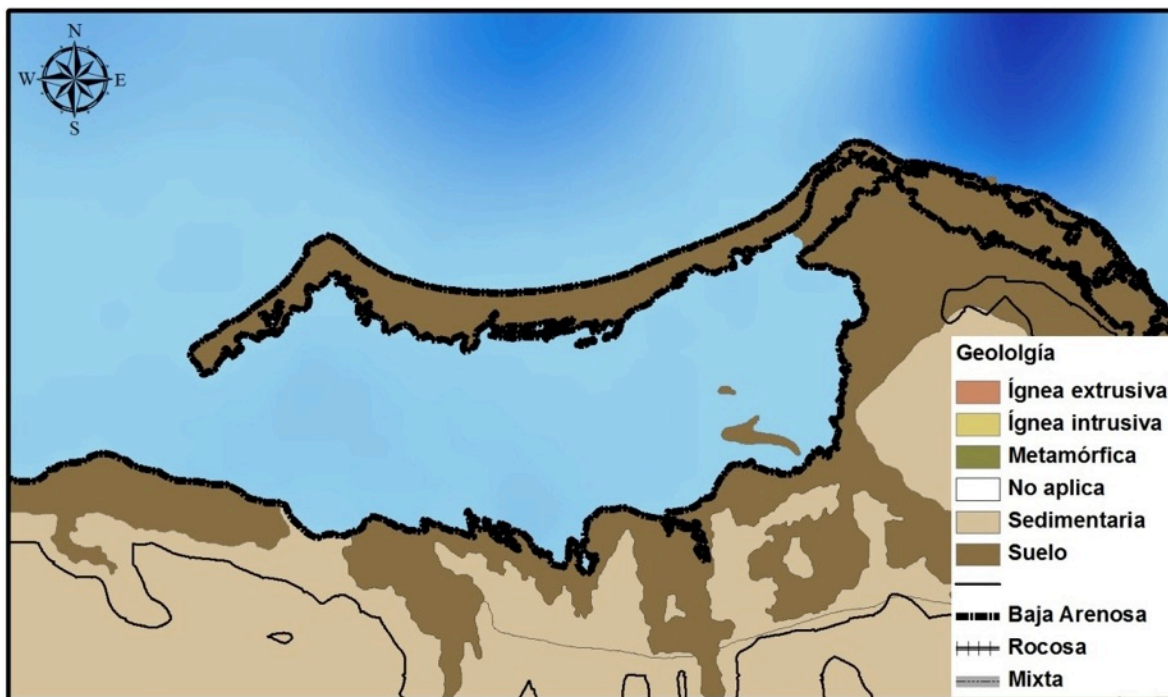


Figura 4.6 Caracterización geomorfológica de Holbox

El transporte litoral, mecanismo generador de la isla de barrera, también le aporta una característica migratoria a la misma, lo que ha ocasionado que la parte donde se ubica la zona habitada de la isla esté sufriendo erosión. Como respuesta, las autoridades y empresarios locales promovieron la colocación de



espigones para retener la arena frente a los desarrollos, estrategia que no ha sido exitosa, promoviendo la erosión en ambos extremos de la zona 'protegida' (Figura 4.7). Adicionalmente, la protección natural provista por manglares y dunas incipientes en otras partes de la playa expuesta no existe en la zona urbana.

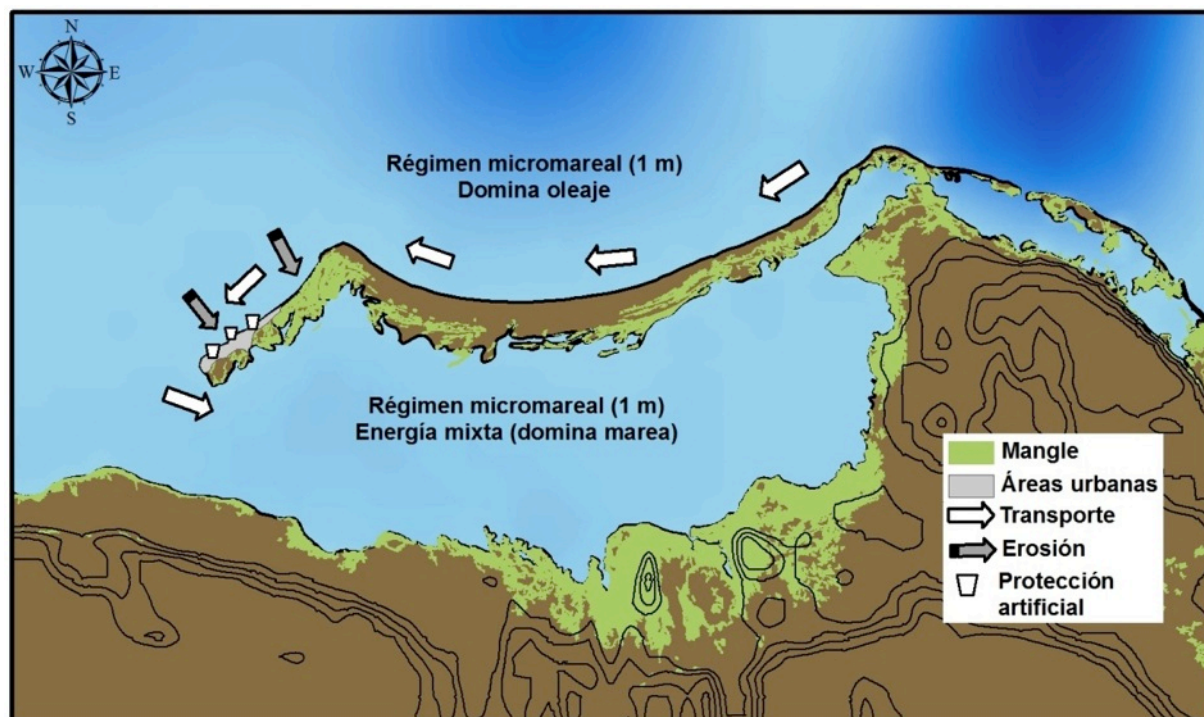


Figura 4.7 Caracterización morfodinámica de Holbox

#### Caracterización socioeconómica

Esta área de estudio se encuentra localizada dentro del municipio de Lázaro Cárdenas (LC) en el Estado de Quintana Roo (Figura 4.1). Su densidad de población es de 7.6 hab/km<sup>2</sup>, presenta un PIB per cápita de 34,600 pesos, con una TPE de 47.29%. Su economía se basa en la pesca y el turismo principalmente, también presenta un desarrollo importante en la apicultura de la península de Yucatán. LC presenta un IDH medio frente a un IM alto, la pobreza en el municipio es mayor al 50% en la moderada y menor al 20% en la extrema. En cuanto a las designaciones especiales de la zona, Holbox se localiza dentro de un área natural protegida de flora y fauna conocida como *Yum-Balam*, también se presenta dentro de la reserva de la biosfera Tiburón Ballena, así como grandes extensiones de sitios RAMSAR.

#### Delimitación de Unidades de Manejo

La identificación de las características físicas y socioeconómicas de la zona de estudio 2, permitió dividirla en dos Unidades de Manejo claramente definidas: la isla de barrera Holbox y la laguna de Yalahau, cuya principal diferencia radica en el nivel de exposición al oleaje y los efectos de éste en el transporte de sedimentos (ver Figura 4.8). Para ello se aplicó la metodología de delimitación de la zona costera a nivel de Unidad de Manejo, descrita en la sección 2.2.2.

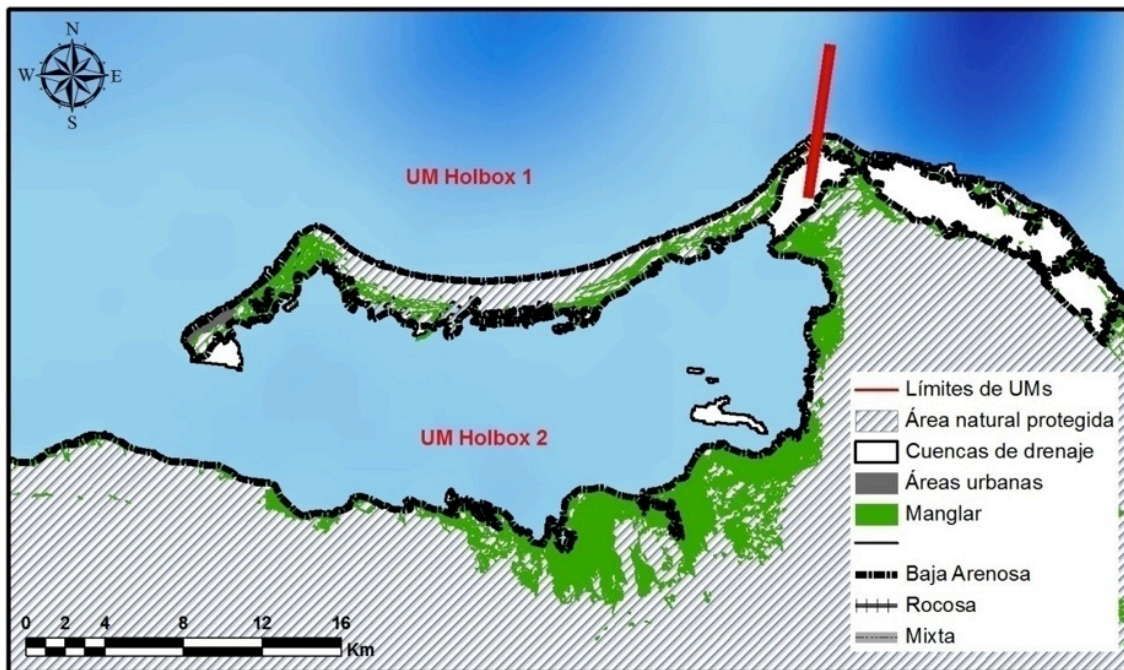


Figura 4.8 Delimitación de Unidades de Manejo en Holbox

A diferencia de la delimitación practicada en la zona de estudio Bahía Banderas, en Holbox, las características físicas y ecológicas identificadas, tales como elevación o presencia de áreas naturales protegidas, son más homogéneas. Además, el nivel de desarrollo urbano y/o turístico es bajo, por lo que tampoco juega un rol importante en la identificación de los límites terrestres de cada UM. En este caso, las consideraciones que pesaron más fueron las geomorfológicas, en el caso de la UM 1, cuyos límites terrestres son los límites mismos de la isla; mientras que en el caso de la UM 2, sus límites terrestres están dados por los alcances del área natural protegida (fuera del área visible en la Figura 4.8). La laguna forma parte de la UM 2.

### 4.3. Identificación de los principales peligros

Adicionalmente a la caracterización física y socioeconómica, el análisis incluyó la identificación de los diferentes peligros que pueden afectar la zona. Dado que este estudio se centra en la respuesta de la costa ante las condiciones hidrodinámicas, solamente se han considerado peligros hidrometeorológicos, como oleaje extremo y marea de tormenta. Al igual que a escala nacional (ver sección 2.3), la identificación de los peligros hidrometeorológicos se realizó a partir de una combinación de modelaciones y de revisión bibliográfica de estudios y modelaciones previas (Arriaga *et al.*, 2010; Durán Valdez *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2008). Se encontró que el oleaje extremo para un punto frente a la zona de estudio, en aguas profundas y para un período de retorno de 100 años es mayor para la región de Holbox que para Bahía Banderas. Esto se debe a la ocurrencia de huracanes, que es mayor en la Península de Yucatán que en la parte central del Pacífico. Por otra parte, la marea de tormenta reportada para ambos sitios indica que, en el caso de Holbox, se observa una variabilidad importante entre la zona de la laguna y la zona expuesta, con 2.5 y 1.5 m de sobre elevación

para un período de retorno de 100 años (Arriaga *et al.*, 2010), mientras que en el caso de Vallarta, se reporta un solo valor para toda el área, que alcanza hasta los 2 m de sobre elevación para un período de retorno de 100 años, cuando se considera un viento constante proveniente del oeste (Durán Valdez *et al.*, 2010).

#### 4.4. Identificación de parámetros de vulnerabilidad

Para poder plantear estrategias de manejo costero adecuadas, además de conocer las características de la zona de estudio, es importante comprender su grado de vulnerabilidad ante los principales peligros. En esta sección se propone una metodología para tal fin basada en el criterio de vulnerabilidad costera de Gornitz (1991) y en su aplicación por Kokot *et al.* (2004). En el contexto de este estudio, el término vulnerabilidad no es entendido como un atributo, sino que son las dos localidades estudiadas en sí mismas el elemento vulnerable (Gornitz, 1991), de tal forma que se entiende por costa vulnerable a la inundación y erosión aquella que presenta características de baja elevación, conformada por sedimento fácilmente erosionable, que sufre o ha sufrido de subsidencia, que no está protegida naturalmente por dunas, manglares, pastos marinos, arrecifes de coral o cualquier otro tipo de elemento natural, que presenta marginación elevada y que está expuesta a oleaje y mareas de gran energía. Con base en esto, la lista de parámetros propuesta a continuación pretende ser un esquema general, pero exhaustivo, que permita establecer la vulnerabilidad comparativa de diferentes zonas costeras, a partir de su caracterización física y socioeconómica:

##### Parámetros físicos

- Elevación media del territorio: representada por valores de altitud e indicadora de riesgo de inundación
- Geología: litología y tipo de sedimento, representa la resistencia a la erosión de los afloramientos
- Geomorfología: características o estructuras morfológicas y naturales
- Desplazamiento vertical de la línea de costa: suma de la subsidencia geológica o tectónica, la antropogénica y el incremento del nivel del mar
- Desplazamiento horizontal de la línea de costa: tasa de erosión o acreción
- Altura de ola significativa: indicativa de la energía del medio y su capacidad erosiva
- Rango de marea: indicativa del potencial de inundación y erosión
- Nivel de protección natural: entendida como presencia de dunas o manglares
- Peligro por oleaje extremo: indicativo de la energía y capacidad erosiva de eventos extremos
- Peligro por marea de tormenta: indicativo de la energía y capacidad erosiva de eventos extremos

##### Parámetros socioeconómicos

- *Población total: personas censadas, nacionales y extranjeras, que residen habitualmente en el área estudiada*
- *Densidad de población: relación entre el número de personas que habita un territorio determinado y la superficie del mismo. El cociente resultante se expresa como número de habitantes por kilómetro cuadrado*
- PIB per cápita: producto interno bruto dividido por la población
- Tasa de participación económica: número de personas económicamente activas por casa
- Índice de desarrollo humano: indicador social compuesto de tres dimensiones: salud, educación e ingresos

- Índice de marginación: medida que permite diferenciar a las áreas geoestadísticas básicas urbanas del país según el impacto global de las privaciones que padece la población
- *Pobreza: personas cuyo ingreso total es insuficiente para adquirir la canasta alimentaria y que, además tienen tres o más carencias sociales*
- *Unidades económicas (sector turismo): cantidad de infraestructura dedicada al servicio del turismo*
- *Producción bruta total: valor de los bienes y servicios producidos por las unidades económicas, durante el tiempo de estudio*
- *Valor agregado bruto (turismo): suma de los valores monetarios de los bienes y servicios, libre de duplicaciones, producidos durante un período determinado (producción bruta menos insumos totales)*
- *Sectores productivos: agrupación de las actividades económicas*
- *Áreas protegidas: Porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional, representativas de los diferentes ecosistemas y de su biodiversidad, en donde el ambiente original no ha sido alterado por el hombre y que están sujetas a regímenes especiales de protección*

Tabla 4.1 Matriz de vulnerabilidad física

Parámetro	Vulnerabilidad				
	1 Muy baja	2 Baja	3 Moderada	4 Alta	5 Muy alta
<b>Elevación media del territorio</b>	≥ 30.1 m	20.1 – 30 m	10.1 -20 m	5.1 -10 m	0 – 5 m
<b>Geología (litología y tipo de sedimento)</b>	Ígnea y metamórfica	Arenisca y conglomerado (firme)	Rocas sedimentarias	Sedimento no consolidado grueso, mal sorteado	Sedimento no consolidado fino (arenas, limos, arcillas)
<b>Geomorfología</b>	Acantilado rocoso	Acantilado medio	Acantilado bajo, costa mixta	Playa, estuario, laguna, planicie aluvial	Playa, barrera, planicie de marea, delta
<b>Desplazamiento vertical relativo</b>	≤ -1.1 mm/a (elevación)	-1.0 – 0.99 mm/a	1.0 – 2.0 mm/a	2.1 – 4.0 mm/a	≥ 4.1 mm/a (hundimiento)
<b>Desplazamiento horizontal</b>	≥ 2.1 m/a (acreción)	2.0 – 1.1 m/a	1.0 – -0.9 m/a	-1.0 – -1.9 m/a	≤ -2.0 m/a (erosión)
<b>Altura significativa de ola (Hs, 1948-2007)</b>	0. – 0.5m	0.5 – 1.0 m	1.0 – 1.5 m	1.5 – 2.0 m	≥ 2.0 m
<b>Rango mareal</b>	≤ 1	1.1 – 2 m	2.1 – 3.4 m	3.5 – 4.9 m	≥ 5.0 m
<b>Nivel de protección natural</b>	Manglares y marismas	Dunas secundarias y terciarias	Dunas primarias	Arrecifes y pastos marinos	Ninguna
<b>Peligro oleaje extremo (100 años)</b>	2.5 – 4.9 m	5.0 – 7.4 m	7.5 – 9.9 m	10.0 – 12.4 m	≥ 12.5 m
<b>Peligro marea tormenta (100 años)</b>	0 – 0.99 m	1 – 1.49 m	1.5 – 2.49 m	2.5 – 4.99 m	≥ 5 m

A cada parámetro se le asignó un valor en una escala del 1 al 5, la cual se estableció tanto cuantitativamente, como cualitativamente, dependiendo del parámetro y con base lo encontrado a partir de la caracterización (ver Tabla 4.1 y Tabla 4.2). Posteriormente, se obtuvo el grado de vulnerabilidad comparativa para cada sección, a partir del análisis detallado de todos los parámetros estudiados y de la aplicación de la ecuación de Gornitz (1991):

$$V = \left[ \frac{1}{n} (a_1 \times a_2 \times \dots \times a_n) \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $a_i$  = parámetro y  $n$  = número total de parámetros presentes.

**Tabla 4.2 Matriz de vulnerabilidad socioeconómica**

Parámetro	Vulnerabilidad				
	1 Muy baja	2 Baja	3 Moderada	4 Alta	5 Muy alta
Densidad de población hab/km <sup>2</sup>	≤ 15.0	15.1 - 100.0	100.1 - 150.0	150.1 – 300.0	≥ 300.1
Tasa de participación económica	≥ 60.1	43.1 – 60.0	25.1 – 43.0	6.1 – 25.0	≤ 6.0
PIB per cápita	≥ 190,001	148,001-190,000	102,001 - 148,000	56,001 - 102,000	≤ 56,000
Índice de desarrollo humano	≥ 0.90	0.74- 0.89	0.59 – 0.73	0.41 – 0.58	≤ 0.4
Índice de marginación	≤ -1.35	-1.34 a -1.02	-1.01 a -0.69	-0.70 a 0.60	≥ 0.61
Pobreza	≤ 19	20 - 39	40 - 59	60 - 80	≥ 81
Unidades económicas	≤ 19	20 - 39	40 - 59	60 - 80	≥ 81
Valor agregado bruto	≤ 19	20 - 39	40 - 59	60 - 80	≥ 81
Áreas protegidas	Ninguna	Santuarios, parques y monumentos	Combinación de las anteriores	Áreas de protección y reservas de la biósfera	Combinación de las anteriores

Los coeficientes obtenidos son adimensionales (ver Tabla 4.3 y Tabla 4.4). Tomando en cuenta los máximos y mínimos del rango posible, se establecieron cuatro categorías: B - baja (1-1.49), M - moderada (1.5-1.69), A - alta (1.7-1.89) y MA - muy alta vulnerabilidad (>1.9). La vulnerabilidad física y socioeconómica resultante para cada zona identificada está presentada al final de cada tabla y en las Figura 4.9 y Figura 4.10.

Se encontró que la importancia relativa de cada parámetro es dependiente de las características de la zona estudiada y del tipo de vulnerabilidad a evaluar. En el caso de la vulnerabilidad a inundación, los dos factores primordiales son la elevación promedio de la zona y el régimen energético a la que está sujeta. En otras partes del mundo, la consideración de la subsidencia natural y antropogénica sería de mayor importancia en la evaluación de la vulnerabilidad a inundación que en México, por ejemplo. De la misma

forma, parámetros como el tipo de sedimento serían prioritarios para evaluar la vulnerabilidad a la erosión. Finalmente, también se encontró que algunos parámetros pueden ser indicativos de otros, cuando no se tiene información específica; por ejemplo, el tipo de sedimento puede ser indicativo de la tasa de erosión y la geología puede ser indicativa del tipo de sedimento. Sin embargo, se puede decir, que entre más parámetros y mayor detalle se incorpore, mejor serán los resultados obtenidos. En el caso de los dos ejemplos presentados en este documento, particularmente en el caso de los parámetros socioeconómicos, se incluye una serie de parámetros que proveen información similar. Esto, además de añadir precisión al método, ya que entre más parámetros se utilicen, más precisos los resultados del análisis, se hizo con la finalidad de proporcionar suficientes alternativas de parámetros para aquellos casos en los que no se cuente con suficiente información.

**Tabla 4.3 Vulnerabilidad física estimada para los dos sitios de estudio**

Parámetro	B. Banderas 1	B. Banderas 2	B. Banderas 3	Holbox 1	Holbox 2
Elevación media del territorio	2	5	1	5	5
Geología (litología y tipo de sedimento)	1	5	1	5	5
Geomorfología	3	5	1	5	4
Desplazamiento vertical relativo	2	2	2	3	3
Desplazamiento horizontal (acreción o erosión)	3	4	3	5*	3
Altura máxima de ola	1	1	1	2	1
Marea astronómica	1	1	1	1	1
Nivel de protección natural	5	5	5	3	1
Peligro oleaje extremo	4	4	4	5	3
Peligro marea tormenta	3	3	3	3	4
<b>Total</b>	1.58 (M)	1.87 (A)	1.48 (B)	1.92 (MA)	1.73 (A)

\*Aunque la naturaleza general de una isla de barrera es deposicional, en este caso, dado el carácter migratorio de la estructura, se le asigna un riesgo muy alto, equivalente al de erosión acelerada, además de que la zona poblada se encuentra frente a una parte donde sí está ocurriendo erosión.

**Tabla 4.4 Vulnerabilidad socioeconómica estimada para los dos sitios de estudio**

Parámetro	B. Banderas 1	B. Banderas 2	B. Banderas 3	Holbox 1	Holbox 2
Densidad de población hab/km <sup>2</sup>	4	5	1	1	1
Tasa de participación económica	1	1	2	3	3
PIB per cápita	4	3	5	5	5
Índice de desarrollo humano	2	2	2	2	3
Índice de marginación	2	1	4	1	5
Pobreza	2	3	4	3	4
Unidades económicas	1	3	1	1	1
Valor agregado bruto	3	3	1	1	1
Áreas protegidas	1	2	1	5	5
<b>Total</b>	1.41 (B)	1.60 (M)	1.53 (M)	1.56 (M)	1.76 (A)



Figura 4.9 Vulnerabilidad física y socioeconómica de las tres Unidades de Manejo delimitadas en Bahía Banderas

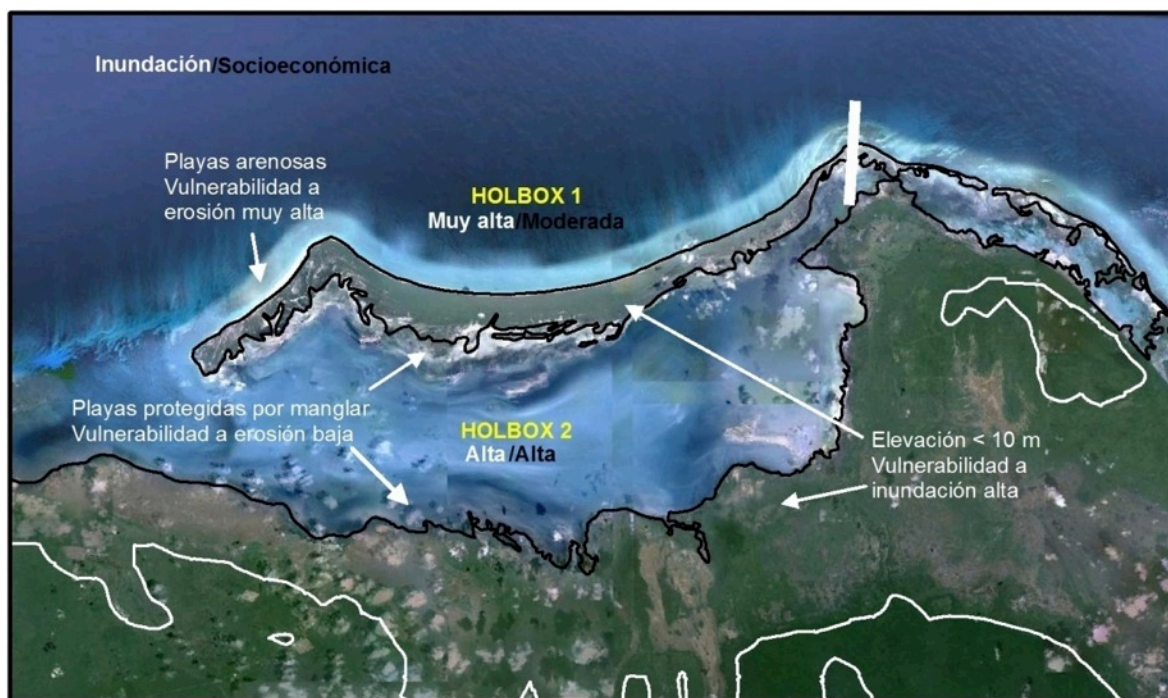


Figura 4.10 Vulnerabilidad física y socioeconómica de las dos Unidades de Manejo delimitadas en Holbox

La metodología utilizada demostró ser una herramienta útil y objetiva para evaluar la vulnerabilidad a la inundación y erosión en diferentes zonas costeras, pues está basada en la medición directa de las características físicas de la zona de estudio. Un aporte de este estudio es que el peligro se consideró como un

parámetro más en la evaluación de la vulnerabilidad y no como un elemento del riesgo, como se hace normalmente. La razón es que no se cuenta con información suficientemente detallada de los peligros para las dos áreas de estudio. Se sugiere ampliar este estudio con una evaluación de los peligros por oleaje extremo y marea de tormenta a menor escala que la evaluada por los estudios existentes, para poder estimar el riesgo de forma cuantitativa.

La gran diversidad de características identificadas en cada zona de estudio pone en evidencia la importancia de realizar este tipo de análisis a escala local, como se ha realizado en este estudio, especialmente, cuando la vulnerabilidad se usa como información base para la toma de decisiones en materia de manejo costero, ordenamiento territorial y planeación urbana. Se espera que este modelo de análisis pueda ser replicado en otras partes de la costa mexicana, para ello, se trató que los rangos cubiertos por cada parámetro, así como los parámetros mismos, fueran tan generales como sea posible. Es importante mencionar que la posibilidad de utilizar este método como herramienta comparativa está limitada por la naturaleza del método mismo, es decir, se deben utilizar exactamente los mismos parámetros y rangos para que se pueda obtener un valor comparable. Asimismo, la potencial utilización de esta metodología para evaluar la vulnerabilidad ante otros impactos como la destrucción de hábitats, dependerá de la cuidadosa elección de los parámetros físicos aplicables en cada caso.

#### **4.5. Recomendaciones para el manejo y propuesta de elementos técnicos para el emplazamiento de obras y actividades a nivel Unidad de Manejo**

A partir del análisis realizado, se puede concluir que la población y los ecosistemas de las dos áreas de estudio analizadas son vulnerables a la inundación y erosión costera provocada por eventos hidrometeorológicos extremos, por lo que es importante planear y actuar ahora para establecer criterios de regulación para el desarrollo de obras y/o actividades dentro de la zona costera que permitan prever la generación de impactos que puedan ser producidos por futuros eventos hidrometeorológicos extremos. Es importante mencionar que el fenómeno de erosión no está limitado a la ocurrencia de eventos extremos, sino que se puede presentar de manera regular, aun durante condiciones de calma (por disminución del aporte natural de sedimentos, por ejemplo), y presentar marcados incrementos en las tasas de erosión durante condiciones extremas. Conocer las características de una zona a detalle, incluyendo la naturaleza de los peligros a las que está sujeta y los impactos que estos pueden provocar, es por tanto, de suma importancia para la planeación y manejo de dicha zona. Algunos de los principales impactos a los que son vulnerables las zonas estudiadas son el desplazamiento de la línea de costa, la destrucción de hábitats, el daño a los desarrollos costeros y la salinización de acuíferos, entre otros. Estos impactos se pueden presentar en escalas espaciales y temporales pequeñas, demostrando la importancia de una caracterización detallada a escala local.

Tomando con base los resultados del análisis realizado en esta sección y aplicando la metodología propuesta en el Capítulo 3, a continuación se presentan una serie de recomendaciones para el manejo de estas dos zonas de estudio, así como de criterios de regulación para obras y/o actividades. Primeramente se recomienda que, para fines de manejo, las zonas identificadas dentro de cada sitio de estudio sean consideradas como Unidades de Manejo independientes. Las características específicas de cada Unidad de Manejo hacen que la estrategia de manejo y los criterios de regulación deban ser diseñados tomando en cuenta, precisamente dichas características.



#### 4.5.1. Bahía Banderas

En el caso del área de estudio de Bahía Banderas, es claro que la Unidad de Manejo ubicada en la parte central de la bahía (Bahía Banderas 2), es la que requiere de mayor atención, ya que no sólo es la zona más vulnerable tanto física como socioeconómicamente, sino también la que presenta la problemática más compleja, dado su nivel de desarrollo. Esta Unidad de Manejo, corresponde al tipo de ambiente número 12 (de acuerdo a la clasificación propuesta en la sección 2.5), el cual está conformado principalmente por playas, con cierta presencia de manglares y está bajo la influencia de un régimen energético mixto, con dominancia del oleaje. Presenta problemas de erosión, que han sido afrontados con espigones y que, lejos de resolver el problema, han generado erosión corriente abajo. Dada la importancia económica de la industria turística en esta zona es imposible reubicar los desarrollos existentes, por lo que la opción de remover los espigones para permitir que la playa recupere su dinámica natural no es viable. Se recomienda por tanto,

- Asegurarse que el sistema de espigones contenga un espigón terminal y abarque toda la celda litoral para evitar erosión diferencial y acompañar el sistema de protección con alimentación artificial de playas recurrente.
- En el caso de las zonas en donde la infraestructura puede ser reubicada o todavía no existe, ésta deberá construirse detrás de la zona de manglares o dunas (a un mínimo de 50 m de distancia, en el caso de manglares y a partir de la duna terciaria, en el caso de dunas), o dejando una zona de amortiguación de al menos 100 m de la línea de pleamar, para permitir el retroceso natural de la costa.
- Las otras dos Unidades de Manejo, Bahía Banderas 1 y 3, presentan una vulnerabilidad tanto física como socioeconómica baja, por lo que la estrategia de manejo no requiere de recomendaciones especiales, además del cumplimiento de la legislación ya existente.

#### 4.5.2. Holbox

Para el caso del área de estudio de Holbox, la cual se dividió en dos Unidades de Manejo, una correspondiente a la parte expuesta de la isla de barrera y otra para la laguna, se estimó una vulnerabilidad física alta. Por otra parte y al contrario de Bahía Banderas, el bajo nivel de desarrollo de infraestructura permite aplicar una estrategia más preventiva que correctiva. La Unidad de Manejo Holbox 1, corresponde a los ambientes 24 y 25 según la clasificación de ambientes propuesta. Estos están caracterizados por formaciones tipo islas de barrera, con presencia de dunas o manglares y dominancia del oleaje. En el caso de esta Unidad de Manejo en particular, las pocas edificaciones existentes a lo largo de la costa no han respetado la naturaleza migratoria de la isla de barrera y están ahora sufriendo las consecuencias de los problemas de erosión. Se recomienda,

- Remover el campo de espigones existente, pues este atrapa el transporte litoral, única fuente de material para la isla de barrera, generando erosión aguda corriente abajo
- Reubicar las construcciones tierra adentro, limitar el tamaño y densidad de éstas y continuar con la política de no pavimentación de calles, la cual permite la percolación natural a través del subsuelo, evitando problemas mayores de erosión e inundación durante la temporada de tormentas.
- En el caso de los ecosistemas de dunas y manglar ubicados sobre la isla de barrera y dado que estos están ligados al adecuado funcionamiento tanto de la isla de barrera como de la laguna, no se debe

permitir la construcción sobre las dunas o a menos de 200 m de la zona de manglar, asegurándose de no obstruir de ninguna forma el flujo hídrico hacia estos últimos.

- En el caso de la Unidad de Manejo Holbox 2, la cual corresponde a la laguna (tipo de ambiente número 26), se recomienda respetar los lineamientos existentes para esta área protegida y limitar todo tipo de construcciones permanentes, ya sean edificaciones o carreteras, que puedan obstruir el flujo de agua dentro de la laguna y en las áreas de manglar.
- Sólo se debe permitir la circulación de embarcaciones pequeñas que no incrementen el nivel de oleaje y turbidez, lo cual puede generar resuspensión de material del fondo, resultando en erosión y pérdida de hábitat.



## Glosario

**Acantilado rocoso.** Línea de costa rocosa de pendiente abrupta y resistencia alta a la erosión.

**Acantilado sedimentario.** Línea de costa de pendiente abrupta, compuesta por material sedimentario, erosionable bajo la influencia del oleaje.

**Acreción.** Avance de la línea de costa hacia el mar, producto de la depositación de material en la playa.

**Altura significativa.** Promedio del tercio mayor de las alturas de ola en un registro dado ( $H_s$ ).

**Ambiente costero.** *Área costera cuyas características hidrodinámicas, geomorfológicas y ecológicas la hacen única dentro del rango de clasificación propuesto.*

**Banco.** *Acumulación de sedimento (arena y limos, principalmente) que ocurre en mares, estuarios y lagunas costeras, generalmente sumergida, aunque puede estar expuesta durante mareas bajas.*

**Berma.** *Cambio en la pendiente o escalón de la playa paralelo a la línea de costa, originado por el depósito de material producto de la acción de las olas.*

**Berma de tormenta.** *Berma formada durante tormentas por acumulación de sedimentos, que no coincide con la berma formado durante condiciones normales de ola.*

**Biocenosis.** *Comunidad de organismos de diferentes especies que coexisten en un espacio definido (biotopo), que ofrece las condiciones ambientales necesarias para su supervivencia.*

**Biotopo.** *Área de condiciones ambientales uniformes que provee espacio vital a un conjunto de flora y fauna.*

**Cambio climático.** *Cambio temporal de los parámetros climáticos, debido tanto a la variabilidad natural como a influencias antropogénicas.*

**Caracterización.** *Identificación de las características físicas y/o socioeconómicas de un sitio.*

**Celda litoral.** *Tramo de costa aislado sedimentológicamente de tramos adyacentes, cuyos extremos están delimitados por fuentes y sumideros de sedimento.*

**Clasificación.** *Categorización de las características físicas y/o socioeconómicas de un sitio.*

**Clima de oleaje.** *Condiciones reinantes (las que ocurren la mayor parte del tiempo) del oleaje.*

**Condición extrema.** *Cuando algún parámetro climático o hidrodinámico (altura de ola, velocidad del viento, etc.) supera el valor de la media más una desviación estándar (Kamphuis, 2000).*

**Condición reinante.** *Condiciones de oleaje o meteorológicas que ocurren la mayor parte del tiempo.*

**Deriva litoral.** *Proceso en el cual el sedimento es movilizado y depositado por la acción de olas y corrientes en la zona litoral.*

**Ecorregiones marinas.** *Área marina cuyas características ecológicas son homogéneas y diferenciadas de otras áreas adyacentes.*

**Ecosistema o componente biótico.** Sistema natural formado por un conjunto de organismos vivos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo).

**Elemento of rasgo geomorfológico.** Elemento o rasgo físico (limitado en el espacio), cuyas características están determinadas por procesos geológicos y/o hidrodinámicos.

*Erosión.* Desagregación de sedimento y/o remoción del material desagregado por agentes hidrodinámicos y meteorológicos.

**Factores antropogénicos.** Situación, forzamiento o proceso originada o derivada de la actividad humana.

**Factores climáticos.** Situación, forzamiento o proceso de origen meteorológico.

**Factores marinos.** Situación, forzamiento o proceso de origen marino.

**Factores socio-económicos.** Situación, característica o proceso de carácter económico o social.

**Hábitat.** Ambiente que ocupa una población biológica.

**Infraestructura importante.** Conjunto de construcciones y desarrollos de *interés público* ubicados en la parte terrestre de la zona costera, donde *interés público* se define con base en los servicios económicos y sociales que esta infraestructura da a la comunidad.

**Peligro.** Amenaza representada por un evento natural que tiene un efecto negativo en la población o medio ambiente.

**Perfil de playa.** Medida de la elevación de la sección transversal de la playa, desde la base de la duna, hasta la profundidad de cierre.

*Playa.* Depósito de material no consolidado (gravas, arenas y limo), formado por la acción de las olas a lo largo de la línea de costa. Sus límites inferior y superior están dados por la profundidad de cierre del perfil de playa y la base de la duna o inicio de vegetación, respectivamente.

*Playa de bolsillo.* Playa pequeña desarrollada entre salientes rocosas.

**Prisma mareal.** Volumen de agua que entra y sale de una laguna costera o estuario entre marea alta y marea baja.

**Proceso.** Conjunto de acciones resultantes de un forzamiento externo (puede ser físico, químico, hidrodinámico, etc.).

**Profundidad de cierre.** Profundidad a la cual ya no se observan variaciones temporales en la batimetría y en la cual no existe transporte de sedimentos inducido por oleaje.

**Regionalización.** División de la zona costera a nivel regional, de acuerdo a sus características físicas.

*Regresión.* Retroceso de la línea de costa tierra adentro, resultado de la erosión, del incremento permanente del nivel del mar, o ambos.

**Riesgo.** Combinación de la probabilidad de ocurrencia de un peligro, la vulnerabilidad o exposición de un área o estructura y las consecuencias de dicho peligro.

**Sedimento.** Material desagregado (gravas, arenas, limos, arcillas).

**Sedimento terrígeno.** Material desagregado de origen terrígeno, es decir transportado hacia la costa por ríos o erosionado directamente de acantilados (alto contenido silíceo).

**Sedimento biogénico.** Material desagregado de origen animal, es decir restos de conchas y caparazones de moluscos (alto contenido de carbonato).

**Tómbolo.** Barra o banco de sedimento no consolidado, emergido, por el cual una isla o estructura queda unida a tierra.

**Transporte eólico.** Transporte de sedimento inducido por la acción del viento.

**Transporte litoral.** Transporte de sedimento inducido por las corrientes costeras resultantes de la incidencia del oleaje en la costa.

**Unidad de manejo.** Tramo de costa cuyas características físicas y socioeconómicas homogéneas la hacen una unidad administrativa independiente en términos de manejo costero integrado.

**Variabilidad climática.** Variación temporal o desviación de la media de parámetros climáticos, como la temperatura.

**Vulnerabilidad.** Nivel de exposición y sensibilidad de una zona, población, ecosistema o ambiente ante un peligro.

**Zona de estrán.** Zona de *swash* o batido del oleaje.

**Zonificación.** División de la totalidad o parte de la zona costera de acuerdo a sus características físicas y/o socioeconómicas.



## Referencias

- Arenas Granados, P., 2010. Gestión del litoral y política pública en España: Un diagnóstico. In: J.M. Barragán Muñoz (Editor), Manejo costero integrado y política pública en Iberoamérica: Un diagnóstico. Necesidad de cambio. Red IBERMAR (CYTED), Cádiz, pp. 353-380.
- Arredondo García, M.C., 2006. Modelo multiescalar de indicadores como herramienta para la planificación ambiental en la región del Golfo de California. Tesis de doctorado. UABC, Ensenada.
- Arriaga, J., Durán, G., Posada, G., Silva, R. y de Brye, S., 2010. Caracterización del peligro hidrometeorológico de marea de tormenta en el Golfo de México. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, p. ^pp.
- ASF, 2011a. Auditoría de desempeño a SEMAR: 09-0-13100-07-1094. Tratados internacionales en materia de medio ambiente, Auditoría Superior de la Federación.
- ASF, 2011b. Auditoría de desempeño a SEMARNAT: 09-0-16100-07-1092. Tratados internacionales en materia de medio ambiente, Auditoría Superior de la Federación.
- ASF, 2011c. Auditoría de desempeño a SRE: 09-0-05100-07-0161. Tratados internacionales en materia de medio ambiente, Auditoría Superior de la Federación.
- Bailey, R.G., 2009. Ecosystem geography. From ecoregions to sites. Springer Science + Business Media.
- Balaguer, P. *et al.*, 2008. A proposal for boundary delimitation for integrated coastal zone management initiatives. *Ocean & Coastal Management*, 51(12): 806-814.
- Beven, K., 1996. Equifinality and uncertainty in geomorphological modelling, The scientific nature of geomorphology: Proceedings of the 27th Binghamton Symposium in Geomorphology. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 289-306.
- Bringas, N. y Touders, D., 2011. Atlas del ordenamiento territorial para el Estado de Baja California. Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, México.
- Brommer, M.B. y Bochev-van der Burgh, L.M., 2009. Sustainable coastal zone management: A concept for forecasting long-term and large-scale coastal evolution. *Journal of Coastal Research*, 25(1): 181-188.
- Castañeda, F. *et al.*, 2007. Importancia de los arrecifes rocosos del norte del Golfo de California.
- CERC, 2000. Coastal engineering manual. US Army Corps of Engineers, Virginia, MA.
- Cisco, 2003. Cuantificación del impacto a la flora por el cambio de uso de suelo por gasoducto de gas natural de Sempra Energy, para E.A. / Energía Costa Azul.
- CONABIO, 2008. Manglares de México, México, D.F.
- CONABIO, 2009. Manglares de México: Extensión y distribución. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 99 pp.
- CONABIO, 2011. Biodiversidad mexicana.
- Cotler, H., Garrido, A., Mondragón, R. y Díaz, A., 2007. Delimitación de cuencas hidrográficas de México, a escala 1:250,000, INEGI-INE-CONAGUA. Documento técnico, México.
- Cowell, P.J. *et al.*, 2003. The coastal tract (part I): A conceptual approach to aggregated modeling of low-order coastal change. *Journal of Coastal Research*, 19(4): 812-827.



- Church, M., 1996. Space, time and the mountain - how do we order what we see?, The scientific nature of geomorphology: Proceedings of the 27th binghamton symposium in geomorphology. John Wiley and Sons, Chichister, pp. 147-170.
- Davis, R.A., 1985. Beach and nearshore zone. In: R.A. Davis y R.L. Ethington (Editors), Beach and neashore sedimentation. Soc. of Econ. Paleon. and Min. Sp. Publ. 24, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., pp. 379-449.
- Davis, R.A. y Hayes, M.O., 1984. What is a wave-dominated coast. Marine Geology, 60: 313-329.
- Dawes, C.J., 1998. Marine botany, New York, pp. 480.
- de Vriend, H.J., 1991. Mathematical modeling and large-scale coastal behaviour (part 1: Physical processes). Journal of Hydraulic Research, 29: 727-739.
- de Vriend, H.J., 2003. On the prediction of aggregated-scale coastal evolution. Journal of Coastal Research, 19(4): 757-759.
- de Vriend, H.J. *et al.*, 1993. Approaches to long-term modelling of coastal morphology: A review. Coastal Enginerring, 21: 225-269.
- Durán Valdez, G., Arriaga García, J.A., Posada Vanegas, G., Silva Casarín, R. y de Brye, S., 2010. Evaluación del peligro inducido por marea de tormenta en los principales puertos de México. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, p.^pp.
- Escofet, A., 2006a. Escalas jerárquicas anidadas, Ordenamiento ecológico marino: Visión temática de la regionalización. INE, México, pp. 87-102.
- Escofet, A.M., 2006b. Escalas jerárquicas anidadas. In: A. Córdova, F. Rosete, G. Enríquez y B. Hernández (Editors), Ordenamiento ecológico marino: Visión temática de la regionalización. INE, México, pp. 87-102.
- Espejel, I. y Bermúdez, R., 2009. Propuesta metodológica para la regionalización de los mares mexicanos, Regionalización de los mares mexicanos para el ordenamiento ecológico marino, pp. 145-224.
- Espejel, I. *et al.*, 2004. Planeación del uso de suelo en la región del golfo de California y Pacífico Norte de México, El manejo costero en México. Epomex, SEMARNAT, CETyS, Univ. de Quintana Roo, pp. 321-340.
- Espejel, I. *et al.*, 2005. Estrategias metodológicas para el manejo de la zona costera: Área de protección de flora y fauna, valle de los Cirios, Baja California, Manejo costero de los municipios de México.
- Félix Delgado, A., 2014. Gestión de zonas costeras con técnicas estocásticas multicriterio. Universidad de Granada, Granada, España, 173 pp.
- Filonov, A.E., Monzon, C.O. y Tereschenko, I.E., 1995. Acerca de la circulación de las aguas en Bahía Banderas, Jalisco, México. VI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar, p.^pp.
- Fonatur, 2002. Plan maestro de desarrollo urbano y turístico de la Bahía de Banderas, Estados de Jalisco y Nayarit.
- García, E., 1988. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios, México.
- García Gastelum, A., 2006. Modelo regional de vulnerabilidad costera. Tesis doctorado. UABC, Ensenada.
- Gómez Pina, G., 2002. La gestión integral de la costa en Estados Unidos: Aspectos positivos a considerar en el modelo español, Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, pp. 441-457.

- González Gándara, C., Cruz Arellano, M., Domínguez Barradas, C., Serrano Solís, A. y Basañez Muñoz, A.d.J., 2007. Macroalgas asociadas a cuatro hábitats del arrecife tuxpan, veracruz, méxico. *Revista UDO Agrícola*, 7(1): 255-257.
- Gornitz, V., 1991. Vulnerability of the east coast, u.S.A. To future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, Special Issue(9): 201-237.
- Guillén, J. y Díaz, J.I., 1990. Elementos morfológicos de la zona litoral: Ejemplos en el delta del ebro. *Scientia Marina*, 54(4): 359-373.
- Hanson, H. *et al.*, 2003. Modelling of coastal evolution on yearly to decadal time scales. *Journal of Coastal Research*, 19(4): 790-811.
- Hayden, B.P., Ray, G.C. y Dolan, R., 1984. Classification of coastal and marine environments. *Environmental Conservation*, 11(2): 199-207.
- Hayes, M.O., 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: S.P. Leatherman (Editor), *Barrier islands*. Academic Press, New York, N. Y., pp. 1-27.
- INE, 2000. Propuesta de estrategia ambiental para la gestión integrada de la zona costera de México, SEMARNAT.
- INEGI, 2001. Xii censo general de población y vivienda 2000. Síntesis de resultados.
- Kamphuis, J.W., 2000. Introduction to coastal engineering and management. *Advanced series on ocean engineering*, 16. World Scientific, Singapore, 437 pp.
- Kokot, R.R., Condignotto, J.O. y Elissondo, M., 2004. Vulnerabilidad del ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de río negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(3): 477-488.
- Komar, P.D., 1997. *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall.
- Lankford, R.R., 1976. Coastal lagoons of Mexico - their origin and classification. In: M.L. Willey (Editor), *Estuarine processes*. Academic Press, New York, pp. 182-215.
- Lindeboom, H., 2002. The coastal zone: An ecosystem under pressure, *Oceans 2020: Science, trends, and the challenge of sustainability*. Intergovernmental Oceanographic Commission, Island Press, Washington, D.C.
- Medina Estrada, R., 2011. Tratados internacionales en materia de medio ambiente - cuenta pública 2009. Seminario sobre conservación de Dunas, Mazatlán, p.^pp.
- Merino, M., 1987. The coastal zone of Mexico. *Coastal Management*, 15: 27-42.
- MMA, 2004. Principales líneas de reorientación de la política de costas, Ministerio del Medio Ambiente, España.
- MMA, 2007. Estrategia para la sostenibilidad de la costa. Nuevo modelo de gestión de la franja costera, Ministerio del Medio Ambiente, Madrid.
- Narayan, S., Hanson, S., Nicholls, R. y Clarke, D., 2011. Use of the source - pathway - receptor - consequence model in coastal flood risk assessment. EGU General Assembly, Vienna, p.^pp.
- Ochoa, E., Olsen, S.B. y Windevoxhel, N., 2001. Avances del manejo costero integrado en proarca/costas, Centro de Recursos Costeros de la Universidad de Rhode Island (CRC-URI), Centro Regional para el Manejo de Ecosistemas Costeros, Ecocostas, Guayaquil, Ecuador.
- OECD, 1991. *Oecd council recommendation on environmental indicators and information*.

- OECD, 1993. Oecd core set of indicators for environmental performance reviews. Environmental monographs.
- Ortega-Gutiérrez, F. *et al.*, 1992. Carta geológica de la república mexicana. 5a. Ed. Instituto de Geología de la UNAM, pp. Instituto de Geología, Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa y texto explicativo.
- Ortiz Pérez, M.A. y de la Lanza Espino, G., 2006. Diferenciación del espacio costero de México: Un inventario regional. Geografía para el siglo xxi. Series de textos universitarios. Instituto de Geografía, México.
- Ortiz Pérez, M.A. y Espinosa Rodríguez, L.M., 1991. Una clasificación geomorfológica de las costas de México. Geografía y Desarrollo, 2(6): 2-9.
- Ortiz Pérez, M.A. y Méndez Linares, A.P., 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del golfo de México y mar Caribe, El manejo costero en México. Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, pp. 307-320.
- Pastakia, C.M.R., 2011. Planning within the coastal zone on an ecosystem foundation. Map Malaysia: Empowering Nation through Geospatial, Kota Kinabalu, Sabah, p.^pp. 14.
- Pedroza, D. *et al.*, 2013. Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Dirección de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial., México, 98 pp.
- Ramírez-García, P. *et al.*, 2002. Distribution and nutrient limitation of surfgrass, *Phyllospadix scouleri* and *Phyllospadix torreyi*, along the Pacific coast of Baja California (México). Aquatic Botany, 74(2): 121-131.
- Ramírez García, P. y Lot, A., 1994. La distribución del manglar y de los "pastos marinos" en el golfo de California, México. Anales de Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica, 65(1): 63-72.
- Rivera Arriaga, E., 2007. El ordenamiento de la zona costera de Campeche: Propuesta de políticas alternas. Tercer Taller de Aportaciones Metodológicas al Ordenamiento Ecológico Marino: Integración de ambientes terrestres y marinos en la zona costera, Tlalpan, México, D.F, p.^pp.
- Rivera Arriaga, E. y Villalobos Zapata, G.J., 2001. The coast of Mexico: Approaches for its management. Ocean and Coastal Management, 44: 729-756.
- Ruiz Martínez, G., 2009. Determinación del estado morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos. Phd thesis, UNAM, 197 pp.
- Saavedra, P., 2004. Estado de derecho de la zona costera en México. In: A. Córdova, F. Rosete, G. Enríquez y B. Hernández (Editors), Ordenamiento ecológico marino: Visión temática de la regionalización. INE, México, pp. 99-114.
- Sarukhán, J. *et al.*, 2009. Síntesis. Conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad, Capital natural de México.
- Seingier, G., Espejel, I. y Fermán, J.L., 2010. Vulnerabilidad de las poblaciones costeras ante la peligrosidad natural, enfoque estatal y municipal. In: E. Rivera Arriaga, I. Azuz Adeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobos Zapata (Editors), Cambio climático en México, un enfoque costero-marino. Universidad Autónoma de Campeche, CETYS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche, Campeche, pp. 669-688.
- SEMARNAT, Programa de manejo integral de zona costera (documento ejecutivo de tareas avanzadas). Subsecretaría de gestión para la protección ambiental, Dirección General de Zona Federal Marítimo

- Terrestre y Ambientes Costeros. Coordinación del Programa de Manejo Integral de Zona Costera, 31 pp.
- SEMARNAT, 2006. Política ambiental nacional para el desarrollo sustentable de océanos y costas de México - estrategias para su conservación y uso sustentable.
- SEPA, 2008. Engineering in the water environment, good practice guide: Intakes and outfalls, Scottish Environment Protection Agency.
- Shepard, F.P., 1973. Submarine geology. Harber & Row Publishers, New York, 517 pp.
- Silva Casarín, R. y Mendoza Baldwin, E., en prensa. Manual de diseño de obras marítimas. Sección a hidrotecnia, capítulo 2.17 obras marítimas, Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Silva, R. *et al.*, 2008. Atlas de clima marítimo para las vertientes mexicanas del pacífico y atlántico, Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Silvester, R. y Hsu, J.R.C., 1997. Coastal stabilization, 14. Advanced Series on Coastal Engineering. World Scientific, Singapore.
- Sorensen, J. y Brandani, A., 1987. An overview of coastal management efforts in latin america. Coastal Management, 15: 1-25.
- Spalding, M.D., Ravilious, C. y Green, E.P., 2001. World atlas of coral reefs. University of California Press, Berkeley, USA.
- van Rijn, L., 1998. Principles of coastal morphology. Aqua Publications, The Netherlands.
- Vasilas, B., Bowman, J., Rogerson, A., Chirnside, A. y Ritter, W., 2011. Environmental impact of long piers on tidal marshes in maryland-vegetation, soil, and marsh surface effects. Wetlands, 31(2): 423-431.

La gestión integrada de las zonas marinas y costeras debe caracterizarse por ser integral, adaptativa, participativa y fundamentada en la mejor información científica disponible, de tal forma que una caracterización de las costas a nivel nacional es imprescindible para proveer las bases técnicas que sustenten el establecimiento de políticas públicas y programas específicos para la protección y manejo sustentable de la zona costera.

A pesar de los esfuerzos llevados a cabo previamente para institucionalizar la gestión de la zona costera en México, ésta ha sido abordada de una manera desvinculada entre los diferentes niveles de gobierno y la sociedad, lo cual ha impedido capitalizar y poner en práctica algunas de las propuestas hechas con anterioridad. Por otra parte, frecuentemente estas propuestas han tenido un enfoque regionalista o sectorial, que ha carecido de una visión integrada de los problemas y sus soluciones.

Este estudio presenta una caracterización y clasificación de los principales ambientes costeros del país, así como la propuesta de lineamientos y regulaciones de obras y actividades que podrían desarrollarse en estos ambientes costeros. Ello permitirá que la gestión integrada de las zonas costeras cuente con información científica relevante. Este documento consta de: (1) una caracterización geomorfológica, hidrodinámica y ecológica; (2) un análisis de los impactos potenciales por ambiente costero; y (3) una evaluación de dos casos de estudio.

Los resultados de este estudio pueden ser utilizados como fundamento para nuevos instrumentos normativos o implementarse en aquellos que cuentan con disposiciones sobre la zona costera.

